

11460  
1  
2ej.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

Carlos Máximo Aire Untiveros

Tesis

Presentada a la División de Estudios de  
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Como requisito para obtener  
el grado de  
MAESTRO EN INGENIERIA  
(CONSTRUCCION)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVERSITARIA

1991



## **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 está 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.

# CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

## INDICE

1.	INTRODUCCION	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Alcance	2
2.	MATERIALES COMPONENTES	5
2.1	Cementos	5
2.2	Agregados	7
2.3	Agua	11
2.4	Aditivos superfluidificantes	12
3.	PROPORCIONAMIENTOS DE MEZCLA	15
3.1	Relaciones básicas	16
3.2	Procedimientos de diseño	17
3.3	Consideraciones básicas	17
4.	PROPIEDADES DEL CONCRETO	20
4.1	En estado fresco	21
4.2	En estado endurecido	22
5.	RESULTADO DE ENSAYES	25
5.1	Diseño de mezclas	25
5.2	Material de cabeceo	30
5.3	Pruebas en concreto fresco	30
5.4	Pruebas en concreto endurecido	32

6.	IMPLICACIONES EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL	40
6.1	Consideraciones generales	42
6.2	Consideraciones estructurales	45
7.	APLICACIONES	55
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59

AGRADECIMIENTOS

REFERENCIAS

TABLAS

FIGURAS

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

El concreto de alta resistencia representa un desarrollo reciente el cual está encontrando utilidad rápidamente, especialmente en la construcción de edificios de gran altura. Sin embargo, el alcance y extensión de las aplicaciones son aún limitados, en parte debido a que no se tiene conocimiento total de las distintas propiedades que gobiernan el comportamiento mecánico de los concretos de alta resistencia. Esto es de esperarse en desarrollos recientes.

El concreto de alta resistencia es un término relativo, lo que es considerado alta resistencia en un lugar puede ser considerado un concreto de resistencia normal en otro lado.

Para el propósito de este trabajo, puede ser conveniente tomar la definición propuesta por Bertero:

"El concreto de alta resistencia es considerado un concreto con una resistencia a compresión mayor de  $420 \text{ kg/cm}^2$  para agregados de peso normal y de  $280 \text{ kg/cm}^2$  para agregados ligeros".

### 1.2 OBJETIVOS

La presente investigación tiene como objetivos:

1. Identificar los materiales y los proporcionamientos que conducen a los mejores resultados en cuanto a resistencia.
2. Determinar las propiedades mecánicas de los concretos en un intervalo de resistencia entre  $400$  y  $1000 \text{ kg/cm}^2$ .

3. Analizar las implicaciones que tiene en el diseño estructural el empleo de un concreto de alta resistencia.

### 1.3 ALCANCE

Para producir concretos arriba de los 400 kg/cm<sup>2</sup> (para agregados de peso normal) se requiere un control de calidad estricto, uso de aditivos y selección cuidadosa de marca y tipo de cemento, y de tipo y tamaño de los agregados.

Con el fin de determinar si se puede alcanzar altas resistencias a compresión en concretos fabricados con materiales comunes en la zona metropolitana de la ciudad de México, se emprendió un programa de ensayos de laboratorio en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, llevada a cabo entre junio de 1989 y junio de 1991. Asimismo, se dispone de especímenes adicionales para obtener información a más largo plazo de las características de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson, deformación diferida y contracción por secado.

La fase preliminar de la presente investigación tuvo como objeto evaluar diferentes tipos y marcas de cemento disponible en el Valle de México, para determinar el de mayor resistencia potencial a compresión. El resultado de ésta investigación preliminar condujo a la selección de un cemento Tipo II Puzolánico (identificación G).

En la siguiente fase se evaluó el comportamiento mecánico de diferentes mezclas de concreto utilizando diferentes agregados (fino y grueso) evaluados en investigaciones previas al presente proyecto. Los resultados permitieron decidir el empleo de agregados finos de origen andesítico y agregados gruesos de origen calizo.

Con el fin de darle las mejores características posibles a los agregados y una mayor concordancia con las normas, en cuanto a granulometría, el agregado grueso fué sometido a un proceso de trituración y el fino a un proceso de lavado y cribado.

Un estudio de aditivos reductores de agua de alta capacidad disponibles en el mercado, permitió seleccionar un superfluidificante a base de melamina.

Los diseños de mezcla fueron realizados teniendo en consideración recomendaciones de investigaciones realizadas en otros países, referente a concretos de alta resistencia y el uso de superfluidificantes. De estas se han tomado en consideración principalmente consumos de cemento, relaciones agua/cemento, proporciones agregado fino/agregado grueso, revenimiento, tiempo de adición de los aditivos superfluidificantes.

En una fase inicial, se prepararon un total de 24 mezclas de concreto de consistencias adecuadas para diferentes consumos de cemento, diferentes relaciones agua/cemento y diferentes proporciones agregado fino/agregado grueso. Se consideran mezclas de consistencia adecuada aquellas con un revenimiento de 2.5 a 5 cm, medida por la prueba del cono de revenimiento, o 3 a 5 segs de tiempo en el ensaye Ve Be, valores que corresponden a mezclas de consistencia semiplástica a rígida.

Los resultados permitieron diseñar 5 mezclas de concreto definitivas con incorporación del aditivo superfluidificante, para diferentes consumo de cemento y relación agua/cemento.

Adicionalmente se preparó una mezcla sin aditivo superfluidificante que se tomó como mezcla de control.

Se presentan los resultados y análisis de los estudios realizados con los diferentes tipos de cemento, agregados fino y grueso, así como también la evaluación de los resultados de los ensayos efectuados a las mezclas de concreto en sus estados fresco y endurecido.

Finalmente, en este estudio se incluye recomendaciones para el diseño de estructuras con concretos de alta resistencia.



## 2. MATERIALES COMPONENTES

La producción de concreto de alta resistencia en obra de adecuada trabajabilidad y resistencia, requiere de la selección de materiales bajo requisitos más estrictos de los que se exigen para la producción de concretos de resistencia normal.

### 2.1 CEMENTOS

La selección del cemento portland para concreto de alta resistencia es extremadamente importante. Las diferentes marcas y tipos tendrán distintas características de desarrollo de resistencia debido a variaciones en su composición y en su finura, dentro de los límites que permite la norma ASTM C 150.

Aunque los ensayos de cubos de mortero pueden dar una buena indicación de la resistencia potencial, se deberán hacer también ensayos en mezclas de concreto. Estas deberán contener los materiales que van a ser usados en obra y preparados con la consistencia propuesta, y determinar su resistencia a 7, 28, 56 y 90 días de edad. El efecto de las características del cemento sobre la demanda de agua es más notable en concretos de alta resistencia debido a los contenidos más altos de cemento<sup>1</sup>.

Se han efectuado numerosos estudios para determinar la influencia de los diferentes tipos de cemento, así como de las características físicas y químicas específicas de los cementos en el funcionamiento de los aditivos superfluidificantes. Resumiendo las principales conclusiones a las que llegaron Perenchio y Le Fraugh, la Asociación de Aditivos para Cemento y la Asociación para Cemento y Concreto de Gran Bretaña<sup>2,3,4</sup>, se puede decir que los aditivos superfluidificantes parecen

ser mucho más efectivos en la reducción de agua y en el desarrollo de la resistencia, al combinarse con cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y molidos a alta finura.

Además, según Malhotra, hay evidencia de que concretos hechos con cementos con contenidos de moderados a altos de aluminato tricálcico (mayor de 9%) muestran pérdida rápida de revenimiento. Lo contrario, según Malhotra, parece ser cierto para concretos hechos con cementos con un bajo contenido de aluminato tricálcico (menor de 5%)<sup>2</sup>.

Según datos del fabricante del aditivo a usar en el estudio, el efecto superfluidificante sólo dura de 30 a 40 minutos después de su inclusión en la mezcla, y que no es recomendable usar adiciones repetidas de superfluidificante para recuperar la trabajabilidad.

Un estudio realizado por Mehta y Aitcin<sup>5</sup>, menciona que también deberían considerarse seriamente a los cementos Portland Puzolánicos (ASTM Tipo IP) para mezclas de concreto de alta resistencia por su adecuado efecto físico-químico asociado con las partículas finas de una puzolana.

### 2.1.1 SELECCION DEL CEMENTO

Para la selección del tipo de cemento a utilizar en el estudio, se determinó la resistencia a compresión, medida en cubos de mortero de 5 cm por lado, de dos cementos Tipo I (identificación A y B), un cemento Tipo II (identificación C), tres cementos Tipo IP Puzolánico (identificación D, E, y F), y un cemento Tipo IIP Puzolánico (identificación G), todos ellos disponibles localmente.

Se preparó una arena de origen sílico que cumple con los requisitos de la norma ASTM C 778 "Tentative Specification for Standard Sand", para la elaboración de los cubos de mortero, ensayados de acuerdo con la norma ASTM C 109 "Standard Method of Test for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50 mm cube specimens).

En la Tabla 1 se presenta el detalle de los ensayos de resistencia a compresión de estos morteros para los diferentes tipos de cemento. La fig 1 ilustra el desarrollo de la resistencia a compresión a través del tiempo de los cementos estudiados. La comparación de estos resultados condujo a la selección del cemento identificado como G para el desarrollo definitivo de la presente investigación. Para efectos de comparación, también se empleó el cemento identificado como C para la fase inicial.

## 2.2 AGREGADOS

Los agregados fino y grueso usados para concreto de alta resistencia, deberán reunir como mínimo, los requerimientos de la norma ASTM C 33 "Standard Specification for Concrete Aggregate"

### 2.2.1 GRANULOMETRIA

#### AGREGADO FINO

La granulometría óptima del agregado fino para concreto de alta resistencia está determinada más por su efecto en el requerimiento de agua que por su arreglo físico. Un estudio al respecto indica que una arena con un módulo de finura (MF) abajo de 2.5 dió una consistencia pegajosa al concreto, haciéndolo difícil de compactar. Una arena con un MF cercano

a 3.0 dió mejor trabajabilidad y resistencia a compresión <sup>6</sup>.

Los concretos de alta resistencia usualmente tienen tan altos contenidos de materiales cementantes que la granulometría de los agregados finos a usar tiene relativamente poca importancia, en comparación con su importancia en los concretos convencionales.

Sin embargo, algunas veces es conveniente aumentar el módulo de finura. Un informe de la Asociación Nacional de Piedra Triturada, Washington D. C., hizo varias recomendaciones con el afán de reducir los requerimientos de agua. Las cantidades que pasan las mallas Nos. 50 y 100 deberán mantenerse bajas, pero dentro de los requerimientos de la norma ASTM C 33 y deberán evitarse contaminación de micras y arcillas <sup>1</sup>.

#### AGREGADO GRUESO

La mayoría de los estudios han mostrado que la resistencia a compresión óptima con altos contenidos de cemento y relaciones agua/cemento bajas se alcanzan con tamaños máximos del agregado grueso de 12.7 mm (1/2") ó 9.5 mm (3/8"). También se han usado satisfactoriamente tamaños máximos de 19.0 mm (3/4") y 25.4 mm (1") <sup>6</sup>.

#### 2.2.2 FORMA DE LA PARTICULA

Muchos estudios han mostrado que la piedra triturada produce resistencias más altas que la grava redondeada <sup>7</sup>. La razón probable para esto es la gran adherencia mecánica que se puede desarrollar con partículas angulosas. Sin embargo, debe evitarse la angulosidad acentuada, debido al elevado requerimiento de agua y reducida trabajabilidad a que conducen estos agregados. El agregado ideal debe ser limpio, cúbico,

anguloso, 100% agregado triturado con un mínimo de partículas planas y alargadas.

### 2.2.3 MINERALOGIA

Debido a que la resistencia por adherencia es el factor limitante en el desarrollo de la alta resistencia, la mineralogía del agregado deberá ser tal que promueva la adherencia química <sup>1,8</sup>.

### 2.2.4 RESISTENCIA INTRINSECA DEL AGREGADO

Parece obvio que el concreto de alta resistencia requiera agregados de alta resistencia y, en alguna forma, esto es cierto. Sin embargo, varias investigaciones han mostrado que, para algunos agregados, se alcanza un punto más allá del cual incrementos adicionales en el contenido de cemento no produce incrementos en la resistencia a compresión del concreto. Esto aparentemente se debe a que se ha alcanzado el límite de la adherencia potencial de la combinación agregado-cemento <sup>9</sup>.

### 2.2.5 SELECCION DE LOS AGREGADOS

Un estudio realizado por el Instituto de Ingeniería para la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano sobre "Influencia de los Agregados en los Concretos Estructurales del Distrito Federal" <sup>10</sup>, tuvo como conclusiones:

1. Los resultados de las pruebas de densidad y absorción muestran una diferencia importante entre las gravas andesíticas y calizas, en favor de las segundas. Si se admite que estas propiedades pueden ser un buen índice del grado de deformabilidad de las rocas que las constituyen, debe esperarse que los concretos hechos con la grava caliza

resulten menos deformables.

2. Las especificaciones de calidad para agregados por lo regular aceptan un máximo de 5% de partículas más finas que la malla No. 200 (74  $\mu\text{m}$ ) en arenas para concretos de uso general, no expuestos a la abrasión. Todas las arenas andesíticas que se utilizan en los concretos del Distrito Federal exceden por mucho este límite, pues sus contenidos de finos suelen fluctuar entre cerca de 10% y algo más de 20%. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas del concreto, para alcanzar los mejores resultados se requiere limitar los finos en la arena a un máximo de 10%.

3. Se observó una diferencia alrededor de 80  $\text{kg}/\text{m}^3$  en el peso volumétrico entre los concretos fabricados con grava caliza y los hechos con andesita, a favor de la primera. Tomando en cuenta la simplicidad de la prueba, se sugiere su ejecución en obra como una primera medida para discriminar entre los dos tipos de concreto.

4. Se encontraron diferencias del orden de 120000  $\text{kg}/\text{cm}^2$  entre los módulos de elasticidad de los concretos hechos con gravas andesíticas y los fabricados con gravas calizas, diferencia que corresponde a un incremento del orden de 80% en los valores alcanzados por estos últimos.

5. En la contracción por secado, el tipo de grava empleada en el concreto tuvo también una influencia notoria. Las contracciones de los concretos con grava caliza fueron del orden de 60% de las alcanzadas en los concretos con las gravas andesíticas.

Este estudio previo sobre agregados de uso común en el Distrito Federal, permitió definir el uso de los siguientes

materiales:

#### AGREGADO GRUESO

Se utilizó grava de origen calizo, disponible localmente.

#### AGREGADO FINO

Se utilizó arena de origen andesítico, disponible localmente.

En la Tabla 2 se presenta las características físicas y granulometría de los agregados fino y grueso, como originalmente llegó del banco local. Además, se presenta la misma información luego de someter a la arena a un proceso de lavado y cribado, y trituración, lavado y cribado de la grava, con el fin de cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 33.

La Tabla 3 presenta en resumen las principales características físicas de los agregados fino y grueso a utilizar y la fig 2 las curvas granulométricas de las mismas.

#### 2.3 AGUA

Los requerimientos para la calidad del agua (determinada por la AASHTO T26) para concreto de alta resistencia no son más estrictos que para concreto normal. Usualmente, se especifica que el agua para concreto sea de calidad potable<sup>11</sup>.

Se utilizó agua potable, procedente del Sistema de Abastecimiento de la UNAM.

## 2.4 ADITIVOS SUPERFLUIDIFICANTES

Los superfluidificantes son una categoría relativamente nueva de aditivos químicos. Sin embargo, se han realizado muchas investigaciones respecto al comportamiento de estos aditivos en las mezclas de concreto <sup>2,12,13</sup>.

Entre la documentación importante del uso de superfluidificantes están las publicaciones especiales del ACI, como: SP 62 "Superplasticizers in Concrete" (1979), SP 68 "Developments in the Use of Superplasticizers" (1981), y SP 119 "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete" (1989).

### DEFINICION

Los términos "superfluidificante", "superplastificante", "super reductor de agua" y "reductor de agua de alto rango", como también son conocidos, son aplicados a un grupo de agentes polímeros dispersantes solubles en agua que son principalmente condensados de formaldehído melamina ó ácido sulfónico naftaleno <sup>14</sup>.

De acuerdo con la norma ASTM C 494 estos aditivos pertenecen a las categorías F y G.

Sin excepción, los aditivos superfluidificantes poseen una marcada capacidad para la dispersión de las partículas, sin presentar efectos colaterales adversos; las floculaciones de cemento aparecen normalmente cuando el cemento se encuentra en una suspensión de agua. Su capacidad a este respecto excede a aquella de los plastificantes compuestos a base de lignosulfonatos no modificados o de ácido polihidroxicarboxílico <sup>15</sup>.



#### 2.4.1 METODOS DE USO

Hay tres formas en que los superfluidificantes pueden ser usados en concreto <sup>4</sup>:

- a. Para producir concreto con una relación agua/cemento baja
- b. Para producir concreto con reducción del contenido de cemento
- c. Para producir concreto fluido

#### NORMAS

Muchos países han emitido especificaciones para el uso de superfluidificantes en concreto. Por ejemplo, la norma Canadiense CAN3-A266.6-M85 cubre el uso de los superfluidificantes para la reducción de agua en los concretos y para concretos fluidos; la normas ASTM C 494 y C 1017, trata el uso de los superfluidificantes en concretos con reducción de agua y concretos fluidos, respectivamente. La norma DIN 1045 (1972) trata el uso de superfluidificantes en mezclas de concreto <sup>16</sup>.

#### 2.4.2 MANEJO Y DOSIFICACION

Los superfluidificantes son suministrados en forma de solución acuosa a diferentes concentraciones según tipo y marca. La dosificación suele ser elevada, por lo que puede repercutir en el precio del m<sup>3</sup> de concreto. Sin embargo, se pueden producir importantes ahorros por otros conceptos (colocación en obra, mayor resistencia de diseño, y consecuentemente, menores secciones) <sup>17</sup>.

#### 2.4.3 SELECCION DEL SUPERFLUIDIFICANTE

La información bibliográfica permitió seleccionar un aditivo superfluidificante a base de melamina, disponible comercialmente.

Sus principales características según el fabricante son:

Es un aditivo líquido de color café oscuro fabricado a base de melamina sulfonatada.

Es un reductor de agua de alto rango (ASTM C 494 Tipo F), autonivelante y acelerante.

Tiene 30% de contenido de sólidos y una densidad de 1.165 g/cm<sup>3</sup> (estos datos fueron determinados en el laboratorio).

Su uso principal es en concretos de muy alta resistencia a temprana edad (100% de resistencia a 36 horas).

Se recomienda no incorporarlo al agua de mezclado y emplearse en dosificaciones de 1% a 3%, y mezclarse durante 3 minutos adicionales después de su incorporación a la mezcla.

La duración de su efecto es de 30 a 40 minutos, dependiente de la temperatura del concreto fresco y de la temperatura ambiente.

No contiene cloruros, ni es caústico, ni inflamable.

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

### 3. PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO

El proporcionamiento de mezclas de concreto de alta resistencia varia ampliamente dependiendo de muchos factores. El nivel de resistencia requerida, la edad de ensaye, las características del material y el tipo de aplicación tienen influencia en el proporcionamiento de la mezcla. Este se ve afectado por aspectos económicos, requerimientos estructurales, práctica de fabricación, ambiente de curado e inclusive por la época del año. Mucha información sobre proporcionamiento de mezclas de concreto se encuentra en el ACI211.1 y el ACI SP 46-9 "Proportioning and Controlling High Strength Concrete".

El proporcionamiento de la mezcla de concreto de alta resistencia es un proceso más crítico que el diseño de mezclas de concreto de resistencia normal. Por lo general, se emplean aditivos puzolánicos especialmente seleccionados y aditivos químicos y se considera esencial la utilización de una baja relación agua/cemento. Se requieren mezclas de prueba para generar la información que permita identificar el proporcionamiento óptimo <sup>1</sup>.

Cuando se requieren resistencias a compresión superiores a 400 kg/cm<sup>2</sup>, las propiedades del agregado asumen importancia creciente. La resistencia propia, la textura adecuada para alta adherencia y la forma y granulometría para producir la trabajabilidad adecuada con un contenido mínimo de agua, son de gran importancia.

Debe tenerse presente que en algunas ocasiones la resistencia de los agregados limita la resistencia del concreto y que las mezclas con contenido elevado de cemento y baja relación agua/cemento no necesariamente producen concretos de alta

resistencia.

Puede afirmarse entonces que el proceso de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia, está enfocado principalmente a la búsqueda del agregado apropiado.

Al calcular el proporcionamiento de una mezcla de concreto para lograr elevadas resistencias debe seleccionarse el tamaño máximo del agregado grueso para lograr la máxima eficiencia del cemento. Según Walker y Bloem, en mezclas ricas de cemento (aquellas que tienen pasta suficiente para cubrir todas las partículas), si se disminuye el tamaño del agregado grueso, aumenta la superficie específica y la adherencia entre el mortero y el agregado mejora, con lo cual se incrementa en forma sustancial la resistencia del concreto <sup>11</sup>.

### 3.1 RELACIONES BASICAS

Las mezclas diseñadas deberán reunir características adecuadas de trabajabilidad, consistencia y resistencia.

Dado que se trabajará con relaciones agua/cemento bajas, para alcanzar mayores resistencias a compresión, el concreto debe ser compactado totalmente. Esto se puede alcanzar por una simple compactación mecánica (varillado), o mediante vibración, dependiendo de la consistencia de la mezcla.

Asimismo, es importante indicar que un incremento en la cohesión debería aumentar la resistencia del concreto, considerándose a ésta, como la forma más directa para conseguir concretos de alta resistencia.

### 3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Aún cuando la disponibilidad de ayudas de diseño de mezcla para concreto de resistencia normal son bastante conocidas, el procedimiento de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia requiere de experiencia, intuición, un profundo conocimiento de los principios básicos, un buen conocimiento de los materiales disponibles y una apreciación de las limitaciones bajo condiciones de campo. Como en la mayoría de los procesos de diseño de mezclas de concreto, es obligatorio el uso de mezclas de prueba.

Así, el procedimiento considerado para la selección de las proporciones de las mezclas de concreto, para el presente estudio, está basado en una recopilación de información sobre experiencias realizadas en otros países como Japón, Canadá, Inglaterra, con concretos de alta resistencia y con superfluidificantes.

De estos reportes de información se han tomado como base recomendaciones sobre contenidos de cemento dentro de la mezcla, revenimiento, proporción agregado fino/agregado grueso, relaciones agua/cemento y momento de adición del aditivo superfluidificante.

### 3.3 CONSIDERACIONES BASICAS

El diseño de las mezclas de concreto incluidas en el presente estudio comprende una secuencia de pasos lógicos y directos que fueron verificados y corregidos en laboratorio mediante mezclas de prueba.

### 3.3.1 CONTENIDO DE CEMENTO

Los contenidos de cemento en concreto de alta resistencia varía entre 400 y 550 kg/m<sup>3</sup> <sup>3,18</sup>.

### 3.3.2 RELACION AGUA/CEMENTO

Los contenidos más altos de cemento y más bajos de agua producen resistencias más altas.

Las relaciones agua/cemento en peso para concretos de alta resistencia varían entre de 0.20 y 0.30. La cantidad de líquidos en los aditivos, en particular en los reductores de agua de alta eficiencia (superfluidificantes), algunas veces se ha incluido en la relación agua/cemento <sup>3</sup>.

### 3.3.3. REVENIMIENTO

Las recomendaciones indican que las mezclas de concreto con reducción de agua deben tener revenimientos entre 2.5 y 5 cm (1" y 2") <sup>3</sup>.

### 3.3.4 PROPORCION AGREGADO FINO/AGREGADO GRUESO

En el proporcionamiento del concreto de alta resistencia, los agregados tienen gran importancia debido a que ocupan mayor volumen que cualesquiera de los otros ingredientes del concreto.

Los bajos contenidos de agregado fino con altos contenidos de agregado grueso, dan como resultado una reducción de los requerimientos de pasta y normalmente las mezclas son más económicas. Las recomendaciones indican que la relación debe estar entre 30 y 42% (en peso).

### 3.3.5 CONTENIDO DE AIRE

No hay evidencia de que el uso de aditivos superfluidificantes incorpore aire adicional a una mezcla de concreto. Para efectos de los diseños se consideró 2% de aire atrapado dentro de la mezcla, siendo verificado este porcentaje por el ensaye correspondiente.

### 3.3.6 CORRECCIONES

Se debe verificar las proporciones teóricas calculadas mediante mezclas de prueba, preparadas de acuerdo con la norma ASTM C 192 "Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".

#### 4. PROPIEDADES DEL CONCRETO

Gran parte del desarrollo del concreto de alta resistencia mediante el uso de superfluidificantes como reductores de agua ha ocurrido en el Japón.

En teoría, una relación agua/cemento cercana a 0.27 es adecuada para la hidratación del cemento, y un contenido adicional de agua sobre esta relación reduce la resistencia a compresión potencial que se puede alcanzar<sup>2</sup>.

Incrementar el contenido de cemento para alcanzar alta resistencia a edad temprana puede originar calor de hidratación excesivo, causando agrietamiento así como contracciones inadecuadas en el concreto. El incremento del consumo de cemento por sí solo no es tan conveniente como una reducción de la relación agua/cemento para conseguir tal fin.

Por lo tanto, resulta conveniente aplicar los medios que propicien la reducción de la relación agua/cemento a valores cercanos al mínimo teórico, congruentes con prácticas constructivas adecuadas. Los superfluidificantes tienden a satisfacer este requerimiento, debido a que con ellos se pueden obtener reducciones de agua entre 20 y 30% mediante su uso adecuado. Los concretos con reducción de agua, mediante el empleo de superfluidificantes, se caracterizan por sus altas resistencias a edades temprana y última, excelente durabilidad e impermeabilidad.

La técnica de producir concreto con relación agua/cemento baja, con el propósito de obtener alta resistencia o retener trabajabilidad con requerimientos mínimos de agua fué iniciada por los japoneses hace 15 años, usando aditivos superfluidificantes a base de condensados de formaldehído



naftaleno sulfonatado.

#### 4.1 EN ESTADO FRESCO

##### 4.1.1. CAPACIDAD DE REDUCCION DE AGUA DE LOS SUPERFLUIDIFICANTES

Informes sobre investigaciones indican que se han alcanzado reducciones de agua del orden de 28% cuando se han usado superfluidificantes a base de condensados de formaldehido melamina sulfonatada.

##### 4.1.2 INCREMENTO EN EL REVENIMIENTO POR LA ACCION DE LOS SUPERFLUIDIFICANTES

Los concretos con superfluidificantes presentan gran incremento en el revenimiento. Sin embargo, este incremento es de corta duración, y en un lapso de 30 a 60 minutos el concreto vuelve a su consistencia original.

Por otro lado, la proporción de pérdida de revenimiento depende del tipo de superfluidificante, su dosificación, temperatura del concreto y del tipo de cemento.

##### 4.1.3 EFECTOS SOBRE TIEMPO DE FRAGUADO

Hay informes que muestran que la adición de los superfluidificantes a base de condensados de formaldehido melamina sulfonatada no afecta contrariamente el tiempo de fraguado del concreto, medido mediante la prueba de resistencia a la penetración.

#### 4.1.4 SEGREGACION Y SANGRADO

No existe segregación ni sangrado del concreto cuando se incorporan superfluidificantes en las dosificaciones recomendadas por el fabricante.

#### 4.1.5 VIBRACION

Algunos concretos de alta resistencia con incorporación de superfluidificantes pueden ser colocados en las cimbras sin la necesidad de compactación mecánica, resultando en ahorros considerables de tiempo y dinero.

#### 4.1.6 CONTENIDO DE AIRE

El contenido de aire atrapado en el concreto con superfluidificante puede disminuir con el tiempo.

Es importante que el contenido de aire del concreto sea determinado inmediatamente después del mezclado y antes del moldeo de los especímenes de ensaye.

### 4.2 EN ESTADO ENDURECIDO

#### 4.2.1 PROPIEDADES MECANICAS

La mejora en las propiedades mecánicas, tales como, resistencia a compresión, tensión, flexión y módulo de elasticidad, está asociada directamente con las reducciones en la relación agua/cemento. Por lo tanto, a menores relaciones agua/cemento mejores propiedades mecánicas.

#### 4.2.2 CONTRACCION

La información disponible indica que la contracción del concreto con superfluidificante es menor que la contracción de un concreto de referencia, debido a la reducción de la relación agua/cemento; aunque hay excepciones.

Para minimizar la contracción lo mejor es emplear concretos con una relación agua/cemento baja y contenido moderado de cemento.

#### 4.2.3 DEFORMACION DIFERIDA

La deformación diferida bajo compresión (propiedad muy importante en elementos pretensados) decrece según el incremento en la resistencia a compresión. Sin embargo, otros autores consideran que, en la mayoría de los casos, no se producen variaciones apreciables en la deformación diferida entre concretos con superfluidificantes con reducción de agua y los concretos elaborados con mezclas comparables pero sin superfluidificante.

#### 4.2.4 CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO

Se tiene información que indica que la incorporación en el concreto de un superfluidificante a base de naftaleno no conduce a la formación de óxido sobre el acero de refuerzo en forma importante.

#### 4.2.5 DURABILIDAD

Una buena resistencia a compresión es, en general, condición necesaria y garantía de una aceptable durabilidad. Dado que los concretos con superfluidificantes pueden tener

resistencias elevadas, esta característica favorece su durabilidad.

## 5. RESULTADO DE ENSAYES

### 5.1 DISEÑO DE MEZCLAS

#### 5.1.1 DISEÑOS PRELIMINARES

Se diseñaron un total de 24 mezclas de concreto, utilizando dos tipos de cemento, seis diferentes consumos de cemento, tres diferentes relaciones agregado fino/agregado grueso, para diferentes relaciones agua/cemento.

Se incluye en el estudio 6 mezclas de concreto sin aditivo. A estas mezclas se les redujo el consumo de agua hasta alcanzar la máxima reducción permisible para consistencia y trabajabilidad adecuadas.

Se presenta además 18 mezclas con aditivo reductor de agua, a las que se les incorporó una cantidad de aditivo capaz de devolver y mantener las características observadas en los concretos sin aditivo.

#### MATERIALES

Se emplearon cemento Tipo II (identificación C) y Tipo II Puzolánico (identificación G), grava de origen calizo de 19 mm (3/4") de tamaño máximo, arena andesítica con un módulo de finura de 3.02 y un aditivo superfluidificante a base de melamina sulfonatada.

#### PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Con base en las Tablas: "Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (ACI211.3-75) (Revised 1987)", se elaboró la primera mezcla de laboratorio (Mezcla 1).

Con el fin de observar el comportamiento de otros concretos, se diseñaron cinco mezclas adicionales (Mezclas 2 a 6) para dos diferentes proporciones agregado fino/agregado grueso y para un consumo de cemento mayor al diseño original.

Teniendo como base los diseños de concreto sin aditivo, se procedió a diseñar mezclas con reducción de agua incorporando el aditivo superfluidificante para mantener la trabajabilidad inicial de las mezclas de referencia (Mezclas 7 a 18).

La homogeneización de la revoltura se logró mediante un mezclado inicial de 3 min, un tiempo de reposo de 5 min y un mezclado final de 4 min .

Durante el proceso de mezclado, fué necesario en algunos casos incluir agua adicional a la teórica de diseño, para satisfacer los requerimientos de revenimiento, 2.5 a 5 cm (1" a 2"), y para darle consistencia y trabajabilidad adecuada.

El aditivo se incorporó a la mezcla durante los 4 últimos minutos de mezclado.

El ensaye de peso volumétrico permitió rediseñar las mezclas de concreto, obteniendo las cantidades reales de los materiales incorporados a ella.

#### ENSAYES Y PREPARACION DE ESPECIMENES

En el estado fresco se efectuaron las pruebas de revenimiento y/o Ve Be, peso volumétrico y contenido de aire.

Se moldearon seis cilindros de 15 x 30 cm (6" x 12") y seis de 10 x 20 cm (4" x 8") para ensayos de resistencia a compresión a edades de 14, 28 y 56 días (dos por edad).

Las mezclas sin aditivo fueron compactadas por varillado, dos capas de 25 golpes cada una, y las mezclas con aditivo fueron compactadas en una mesa de vibración, dos capas durante 15 segs cada una.

Finalmente, con los resultados de resistencia a compresión a 28 días de edad (Mezclas 1 a 18), se diseñaron seis mezclas de concreto con aditivo (Mezclas 19 a 24) para diferentes consumos de cemento con el fin de observar el desarrollo de la resistencia a compresión.

En esta etapa de la investigación se determinó usar cemento Tipo II Puzolánico (identificación G) e incorporar 2% de aditivo superfluidificante.

Las Tablas 4 a 6 presentan el detalle de las mezclas 1 a 24.

#### 5.1.2 DISEÑOS DEFINITIVOS

Se prepararon cinco mezclas de concreto con aditivo superfluidificante (Mezcla B a F), y una mezcla de concreto de referencia (Mezcla A), todas ellas elaboradas con cemento Tipo II Puzolánico (identificación G).

La mezcla de concreto de referencia corresponde a la mezcla preliminar que presentó mejor comportamiento de resistencia a compresión (Mezcla 5 = Mezcla A).

Con los resultados obtenidos de los ensayos preliminares (Mezclas 16 a 24, cemento Tipo II Puzolánico, identificación G, relación arena/grava 48/52) se preparó una gráfica (fig 3) que relaciona el consumo de cemento y la resistencia a compresión a 28 días de edad, obteniéndose lo siguiente:

Contenido de Cemento kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión a 28 días kg/cm <sup>2</sup>
300	475
350	625
400	725
500	850

Además se preparó otra gráfica (fig 4) que relaciona la relación agua/cemento y la resistencia a compresión a 28 días, con los resultados obtenidos de las mezclas Nos. 7, 8, 11, 13, y de la 16 a la 24. Esta gráfica fué correlacionada con los datos del ACI 211, obteniéndose lo siguiente:

Relación w/c (en peso)	$f'_{c28 \text{ días}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuente
0.27 *	850	Experimental **
0.31 *	725	Experimental **
0.34 *	625	Experimental **
0.39 *	475	Experimental **
0.38	450	ACI 211
0.43	400	ACI 211
0.48	350	ACI 211
0.55	300	ACI 211
0.62	250	ACI 211
0.70	200	ACI 211
0.80	150	ACI 211

\* Relación agua/cemento en peso, que incluye la parte líquida del aditivo.

\*\* Resultados de la investigación



Finalmente, se hizo una correlación de estos resultados experimentales y se elaboraron 4 diseños teóricos, con las siguientes características:

TABLA DE DISEÑO TEORICA EXPERIMENTAL

Relación (w + aditivo)/c (en peso)	Contenido de cemento kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión, 28 días kg/cm <sup>2</sup>
0.39	300	475
0.34	350	625
0.31	400	725
0.27	500	850

Con la tabla anterior se elaboraron 4 mezclas (Mezclas B a E) y una adicional (Mezcla F) similar a la mezcla E pero con mayor consumo de cemento (550 kg/m<sup>3</sup>). A todas se les incorporó 2.5% del aditivo superfluidificante, con el fin de darle mayor trabajabilidad que la observada en las mezclas preliminares.

La secuencia del mezclado fué modificada a 3' de mezclado inicial, 1' de reposo y 3' de mezclado final. El aditivo fué incorporado en los 3 últimos minutos de mezclado.

#### ENSAYES

Donde fué aplicable se realizó la prueba de revenimiento con el Cono de Abrams. En las otras se efectuó la prueba Ve Be.

El ensaye del peso volumétrico fué realizado después de compactar el concreto por vibración, en dos capas, 15 segs de

vibrado cada una.

También se realizó la prueba del contenido de aire.

Se prepararon especímenes para la determinación de la resistencia a compresión, módulo elástico estático, relación de Poisson, resistencia a tensión, resistencia a flexión, deformación diferida y contracción por secado. Todos los especímenes fueron moldeados en dos capas vibradas durante 15 segs cada una.

La Tabla 7 presenta el detalle de las mezclas A a F.

## 5.2 MATERIAL DE CABECEO

Se hizo un estudio de materiales para obtener una combinación adecuada del azufre con otro componente para el cabeceo, que reuniera el requisito de alta resistencia requerido.

La Tabla 8 presenta las diferentes combinaciones de azufre con otros materiales, para obtener el material para cabeceo.

La combinación óptima fué 40% polvo de arena andesítica (pasa malla No. 100) y 60% azufre.

## 5.3 PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO

### PESO VOLUMETRICO

En promedio existe una relación de 1.025 entre los pesos volumétricos de las mezclas de concreto con aditivo superfluidificante y las mezclas sin aditivo (Tabla 9).

Esto quiere decir que el aditivo superfluidificante contribuye

a incrementar el peso volumétrico de las mezclas de concreto, al sustituir parte del agua de mezclado por otros materiales mas densos.

#### CONSISTENCIA

La consistencia de las mezclas de concreto sin aditivo, medida mediante la prueba del cono de revenimiento estuvo entre 2.5 y 8.0 cm (1" y 3 1/4") (Tablas 4 y 5) y las mezclas con superfluidificante una consistencia, medida mediante la prueba Ve Be entre 5 y 6 segs (Tabla 10). Es importante señalar que las mezclas antes de la incorporación del aditivo presentaron una consistencia rígida. La inclusión del superfluidificante permitió mejorar la trabajabilidad.

#### CONTENIDO DE AIRE

El contenido de aire de las mezclas de concreto sin aditivo estuvo entre 2.0 y 2.5% (Tablas 4 y 5), y aquellas con aditivo superfluidificante entre 1.3 y 2.0% (Tabla 10). Siendo el contenido de aire teórico de la mezcla de concreto similar al obtenido se puede decir que el aditivo no incluye aire adicional a la mezcla de concreto.

#### REDUCCION DE AGUA

La máxima reducción de agua alcanzada mediante la incorporación del aditivo superfluidificante fué de 31.9%, para las mezclas con cemento Tipo II (identificación C) y de 30.1% para las mezclas con cemento Tipo II Puzolánico (identificación G) (Tabla 4, fig 5).

Estas máximas reducciones de agua fueron alcanzadas observando que las mezclas asi obtenidas presentaron una consistencia

adecuada (Mezclas 15 y 17, 6 segs de tiempo Ve Be).

La fig 6 muestra que la incorporación del aditivo superfluidificante permite reducir el consumo de agua de la mezcla de concreto, por lo tanto, su relación agua/cemento.

#### 5.4 PRUEBAS EN CONCRETO ENDURECIDO

##### PESO VOLUMETRICO

La Tabla 11 presenta una comparación entre los pesos volumétricos del concreto en estado endurecido y fresco de las mezclas A a la F. En promedio existe 2% de incremento del peso volumétrico en estado endurecido respecto del estado fresco debido principalmente a la reducción de volumen que origina la contracción.

##### RESISTENCIA A COMPRESION

1. La resistencia a compresión mas elevada alcanzada a los 28 días de ensaye en cilindros de 10 x 20 cm (4" x 8") fué de 844 kg/cm<sup>2</sup>. Los valores correspondientes de resistencia a los 14 y 56 días fueron de 782 y 920 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente (Tabla 4). Esta corresponde a la mezcla 17 fabricada con cemento Tipo II Puzolánico (identificación G) con un consumo de cemento de 417 kg/m<sup>3</sup>, una relación agua/cemento de 0.29, agregado grueso de 19 mm (3/4"), una relación agregado fino/grueso de 48/52, un consumo de aditivo de 9 lit/m<sup>3</sup>, correspondiente a una reducción de agua de 30.1% de una mezcla sin aditivo (Mezcla 5).

2. La relación promedio entre la resistencia a compresión a los 14 y 28 días fué de 0.83 para los concretos sin aditivo y de 0.93 para los concretos con aditivo superfluidificante

(Tabla 12).

Esta relación es mayor para las mezclas con mayor reducción de agua. Esto puede explicarse tomando en cuenta que, en concretos de alta resistencia, con altos consumos de cemento, existe un desarrollo de resistencia acelerado a edades tempranas, como consecuencia del aumento de temperaturas internas de curado generado por el mayor calor de hidratación propiciado por el mayor consumo de cemento en estos concretos.

3. La relación promedio entre la resistencia a compresión a los 56 y 28 días fué de 1.04 para los concretos sin aditivo y de 1.06 para los concretos con aditivo superfluidificante (Tabla 12). En general esta relación es mayor para los concretos con incorporación del aditivo, y la relación va disminuyendo a medida que se reduce el consumo de agua (menor relación agua/cemento) debido a que se desarrollan mayores resistencias a edades tempranas.

4. La relación promedio entre las resistencias a compresión obtenida de ensayos a compresión en cilindros de 10 x 20 cm (4" x 8") y de 15 x 30 cm (6" x 12") fué de 1.06, independientemente de la edad de ensaye.

5. La Tabla 13 presenta la influencia del consumo de cemento en la resistencia a compresión.

La resistencia a compresión obtenida a 28 días de edad fué del orden de 840 kg/cm<sup>2</sup>, independientemente del consumo de cemento. Puede decirse entonces que existe un límite en el contenido de cemento, a partir del cual todo incremento en el consumo no es significativo ni económico para aumentar la resistencia a compresión. Es obvio que, el diseño óptimo será aquel que contenga el menor consumo de cemento. Para este

estudio el consumo óptimo estuvo alrededor de 400 kg/m<sup>3</sup>.

6. La menor relación agua/cemento, alcanzada como consecuencia de la máxima reducción de agua, puede utilizarse para aumentar la resistencia a compresión, o para reducir el contenido de cemento en la mezcla; sin embargo, no sólo la disminución en la relación agua/cemento incrementa la resistencia, sino también la selección adecuada de los agregados y su proporción dentro de la mezcla.

En este caso particular, se obtuvo mayores resistencias a compresión a 28 días de edad con una proporción agregado fino/agregado grueso de 48/52.

7. En la Tabla 14 se presenta las máximas resistencias a compresión alcanzadas para las máximas reducciones de agua de los diferentes diseños para dos consumos y dos tipos de cemento.

8. Para efectos de la presente investigación puede estimarse que el valor óptimo del consumo del aditivo superfluidificante para obtener altas resistencias a compresión está entre 2.0 y 2.5% en peso de cemento (8 y 9 lit/m<sup>3</sup>), fig 7.

9. El consumo de agua gobierna el desarrollo de la resistencia a compresión. A mayor reducción de agua y, por lo tanto, menor consumo de la misma, se obtendrán mayores resistencias (figs 8 y 9).

10. La Tabla 15 presenta un resumen de las resistencias a compresión alcanzadas a los 90 días de ensaye en cilindros de 15 x 30 cm (6" x 12") y 10 x 20 cm (4" x 8"), para las mezclas A a F.

Puede verse que la resistencia de diseño medida en cilindros de 15 x 30 cm (6" x 12") para cada caso particular se alcanza a los 90 días de edad. A los 28 días se alcanza en promedio el 85% de la resistencia de diseño.

La resistencia a compresión, medida en cilindros de 10 x 20 cm (4" x 8"), alcanza, en promedio, el 105% de la resistencia de diseño a los 90 días de edad y el 88% a los 28 días.

Estos valores justifican la conveniencia de proponer la determinación de la resistencia de diseño a edades posteriores (56 ó 90 días) en lugar de los convencionales 28 días, cuando en la elaboración de los concretos se emplea cemento puzolánico.

11. En promedio, para los concretos con incorporación de aditivo, existe una relación de 0.966, 1.064 y 1.152 entre las resistencias a los 14, 56 y 90 días, respecto a la de los 28 días de ensaye, respectivamente.

Para el concreto de referencia existe una relación de 0.897, 1.094, y 1.157 entre las resistencias a 14, 56 y 90 días respecto a la de los 28 días.

La Tabla 16 presenta los valores individuales de estas relaciones. Puede notarse que hay un mayor desarrollo de resistencia a edades tempranas (14 días) en los concretos fabricados con el superfluidificante comparada con la mezcla de referencia sin aditivo.

Con los datos de la Tabla 16 y los valores de resistencia a compresión a 28 días de edad de cada mezcla, se encontraron <sup>estas</sup> expresiones que relacionan la resistencia a compresión a una edad cualquiera, con la alcanzada a 28 días, que son  $E = \dots$

$$\text{Mezcla A} \quad F_c = \frac{t}{13.6 + 0.7t} F'_c$$

$$\text{Mezcla B} \quad F_c = \frac{t}{5.8 + 0.8t} F'_c$$

$$\text{Mezcla C} \quad F_c = \frac{t}{7.0 + 0.8t} F'_c$$

$$\text{Mezcla D} \quad F_c = \frac{t}{19.8 + 0.6t} F'_c$$

$$\text{Mezcla E} \quad F_c = \frac{t}{3.8 + 0.8t} F'_c$$

$$\text{Mezcla F} \quad F_c = \frac{t}{14.5 + 0.7t} F'_c$$

## RESISTENCIA A TENSION

### a. MODULO DE ROTURA

La Tabla 17 presenta el módulo de rotura de los concretos con superfluidificante y el de referencia (Mezclas A a F).

La resistencia a flexión promedio, a 28 días de edad, para los concretos con superfluidificante es de 71.4 kg/cm<sup>2</sup>, correspondiente a 12% respecto a la resistencia a compresión (13.5% para la mezcla de referencia).



La fig 10 presenta la correlación obtenida entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión.

$$f_r = 2.88 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{valor medio})$$

#### b. COMPRESION DIAMETRAL (PRUEBA BRASILEÑA)

La Tabla 17 presenta la resistencia a tensión de los concretos con superfluidificante y el de referencia.

La resistencia a tensión promedio, a 28 días de edad, para las mezclas con superfluidificante es de  $38 \text{ kg/cm}^2$ , correspondiente 7.8% de la resistencia de compresión (8.1% para la mezcla de referencia).

La fig 11 presenta la correlación obtenida entre la resistencia a tensión y la resistencia a compresión.

$$f_T = 1.85 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{valor medio})$$

#### MODULO DE ELASTICIDAD

La Tabla 17 presenta el módulo de elasticidad de los concretos con superfluidificante y el de referencia (Mezclas A a F).

La Fig 12 presenta la correlación obtenida entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión.

$$E_c = 14300 \sqrt{f'_c} \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

#### RELACION DE POISSON

Se encontraron valores para la relación de Poisson del orden

de 0.20 (Tabla 17, fig 13).

### CONTRACCION POR SECADO

La contracción por secado de las mezclas de concreto puede estimarse por las siguientes expresiones

$$\text{Mezcla A} \quad c = \frac{t^{1.21}}{38.0 + t^{1.21}} \quad 6.09 \times 10^{-4}$$

$$\text{Mezcla B} \quad c = \frac{t^{0.93}}{27.1 + t^{0.93}} \quad 4.32 \times 10^{-4}$$

$$\text{Mezcla C} \quad c = \frac{t^{0.95}}{38.6 + t^{0.95}} \quad 5.94 \times 10^{-4}$$

$$\text{Mezcla D} \quad c = \frac{t^{0.78}}{19.2 + t^{0.78}} \quad 4.98 \times 10^{-4}$$

$$\text{Mezcla E} \quad c = \frac{t^{0.97}}{44.6 + t^{0.97}} \quad 4.12 \times 10^{-4}$$

$$\text{Mezcla F} \quad c = \frac{t^{1.12}}{71.0 + t^{1.12}} \quad 5.45 \times 10^{-4}$$

Se puede apreciar que la contracción última es del mismo orden para los concretos con y sin aditivo superfluidificante usado en este estudio.

La Fig 14 presenta la correlación obtenida entre la contracción por secado y el tiempo (Mezcla C).

#### DEFORMACION DIFERIDA

Se dejaron especímenes para obtener información de largo plazo.

## 6. IMPLICACIONES EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Los concretos de alta resistencia tienen algunas características y propiedades ingenieriles que difieren de las de los concretos de baja resistencia. Las diferencias en las propiedades mecánicas son más importantes mientras más altas sean las resistencias y se deben tener presentes en el diseño, para asegurar una buena respuesta de la estructura.

Las recomendaciones para diseño de miembros y estructuras de concreto de alta resistencia que actualmente se conocen están basadas en la información experimental disponible y en la mayoría de los casos se debe considerar como tentativa.

En algunas áreas del comportamiento, donde aún no se tiene información disponible, tales como, adherencia, longitud de anclaje y desarrollo, parece conservador diseñar sobre la base de las propiedades de un concreto de resistencia normal. En otras áreas, tales como, cortante, tensión diagonal y torsión, diseñar usando criterios aplicados a materiales de resistencia normal no necesariamente es seguro debido a las diferencias en las características de falla del material de más alta resistencia.

El diseñador debe estar consciente de que muchas de las normas y códigos existentes suponen resistencias de diseño para el concreto inferiores a  $400 \text{ kg/cm}^2$ . Es necesario un buen juicio ingenieril para la utilización de concretos de más alta resistencia.

Las expresiones comunes relativas a módulo de elasticidad, resistencia a tensión y otras propiedades mecánicas del concreto se han derivado de la información reunida del ensaye de concretos de baja a moderada resistencia. La aplicabilidad

de las normas de diseño existentes deben revisarse en función de lo que implica su empleo en el comportamiento de las estructuras de concreto de alta resistencia.

#### REVISION DE LAS NORMAS ACI 318 Y DDF

Unas preguntas que deben plantearse los diseñadores y constructores son "¿ el concreto de alta resistencia debe ser aceptado para aplicaciones estructurales generales?, ¿ son adecuadas las recomendaciones de las normas existentes (ACI 318, DDF) para diseño de concreto de alta resistencia?"<sup>19</sup>.

En las normas existentes, muchos parámetros de diseño que afectan la resistencia y comportamiento de los miembros estructurales están relacionados empíricamente con la resistencia a compresión del concreto. Estos parámetros empíricos se han establecido a partir de concretos con resistencia a compresión menor que  $400 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo tanto, se debe cuestionar si las recomendaciones de las normas existentes pueden proporcionar seguridad y servicio adecuados para el concreto de alta resistencia, o si hay algunas limitaciones que prevengan el uso efectivo del concreto de alta resistencia.

Se pueden agrupar estas incógnitas en tres categorías:

La primera incluye aspectos relacionados con Requisitos generales, Definiciones, Materiales, Calidad del concreto, Mezclado y colocación del concreto, Cimbras, Tuberías ahogadas y Juntas de colado, Detalles del refuerzo, Sistemas de losas en dos direcciones, Concreto prefabricado, y Evaluación de la resistencia de estructuras existentes, en los cuales las recomendaciones no se ven afectadas directamente por la resistencia a compresión. Por lo tanto, deberían ser

aplicables igualmente a todas las clases de concreto estructural, independientemente de su resistencia.

La segunda categoría incluye aquellas recomendaciones sobre la cual la resistencia podría tener un efecto importante. Estos temas se refieren a Análisis y diseño, Requisitos de resistencia y serviciabilidad, Cargas axiales y de flexión, Cortante y torsión, Longitudes de desarrollo y empalmes del refuerzo, y Concreto presforzado.

La tercera categoría incluye aquellas recomendaciones que deberían ser revisadas después de que sean resueltas las dudas de la segunda categoría. En esta categoría están aspectos relacionados con Muros, Zapatas, Elementos de concreto compuestos sujetos a flexión, Cascarones y placas delgadas, Disposiciones especiales para el diseño sísmico.

Las revisiones requeridas están relacionadas con el esfuerzo de corte permisible, esfuerzo de tensión, esfuerzo de corte horizontal, efecto de relación de esbeltez, refuerzo mínimo, etc. .

## 6.1 CONSIDERACIONES GENERALES

### 6.1.1 ESFUERZO-DEFORMACION EN COMPRESION

Una de las propiedades importantes del concreto de alta resistencia en cuanto al diseño por flexión es la relación esfuerzo-deformación en compresión.

Muchas investigaciones experimentales se han llevado al cabo para obtener las curvas esfuerzo-deformación de concretos de alta resistencia en compresión. Se reconoce que para concreto de alta resistencia, la forma de la parte ascendente de la

curva es más lineal y con mayor pendiente. La pendiente de la parte descendente es también mayor, en comparación con la que corresponde a un concreto de resistencia normal (fig 15).

### 6.1.2 MODULO DE ELASTICIDAD

El módulo secante de elasticidad se define como la secante de la curva esfuerzo-deformación en compresión uniaxial a un nivel de esfuerzo de 40% del esfuerzo máximo.

Una correlación entre los módulos de elasticidad  $E_c$  y la resistencia a la compresión  $f'_c$  para concretos de peso normal es (ACI y DDF, respectivamente)

$$E_c = 10600 \sqrt{f'_c} + 70300 \text{ kg/cm}^2 \text{ para } 200 < f'_c < 800 \text{ kg/cm}^2$$

(ACI 318)

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ para } 200 < f'_c < 400 \text{ kg/cm}^2$$

(DDF 87)

$$E_c = 14300 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ para } 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

(esta investigación)

### 6.1.3 RESISTENCIA A TENSION

La resistencia a tensión del concreto se puede determinar experimentalmente en tres formas diferentes: (1) ensaye a tensión uniaxial; (2) ensaye en compresión diametral en cilindros y (3) ensaye de flexión en vigas. El primer método de obtención de la resistencia a tensión se puede considerar

como "directo", y el segundo y tercer métodos como "indirectos".

Muchos ingenieros asumen que la resistencia a tensión directa del concreto es alrededor de 10% de su resistencia a compresión; la resistencia a tensión por compresión diametral también 10%, o quizá 11% ; y el módulo de rotura casi 15% de la resistencia a compresión.

Basados en información experimental disponible de ensayos de cilindros por compresión diametral y de ensayos por flexión en vigas sobre concretos de resistencias bajas, medias, y altas, se han propuesto ecuaciones empíricas para predecir la resistencia a tensión por compresión diametral  $f_{sp}$  y el módulo de rotura  $f_r$ , como

$$f_r = 3.10 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 200 < f'_c < 800 \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{ACI})$$

$$f_r = 2.00 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 200 < f'_c < 400 \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{DDF})$$

$$f_r = 2.12 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 400 < f'_c < 900 \quad \text{kg/cm}^2$$

(esta investigación) (valor límite inferior)

$$f_{sp} = 1.96 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 200 < f'_c < 800 \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{ACI})$$

$$f_{sp} = 1.50 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 200 < f'_c < 400 \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{DDF})$$

$$f_{sp} = 1.69 \sqrt{f'_c} \quad \text{kg/cm}^2 \quad \text{para } 400 < f'_c < 900 \quad \text{kg/cm}^2$$

(esta investigación) (valor límite inferior)



#### 6.1.4 RELACION DE POISSON

La relación de Poisson bajo condición uniaxial se define como la relación de deformación lateral a deformación en la dirección de la carga.

Se han reportado valores para la relación de Poisson de concretos de alta resistencia entre 0.20 y 0.28. El mismo reporte incluye que esta relación tiende a disminuir cuando se incrementa la relación agua/cemento.

En este estudio se encontraron valores alrededor de 0.20, Tabla 17, fig 13.

#### 6.2 CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

##### 6.2.1 COLUMNAS CARGADAS AXIALMENTE

Pocas columnas en la práctica están sujetas a carga perfectamente axial.

##### a. CONTRIBUCION DE LA RESISTENCIA DEL ACERO Y CONCRETO

La predicción de la resistencia de una columna sujeta a carga axial puede ser evaluada mediante la ecuación

$$P = 0.85 f'_c A_c + f_y A_s \quad (\text{ACI})$$

$$P_u = F_r (f_c'' A_g + f_y A_s) \quad (\text{DDF})$$

$$f_c^* = 0.85 f'_c$$

$$f_c'' = f_c^* \left( 1.05 - \frac{f_c^*}{1250} \right)$$

donde

$f'_c$  : Resistencia especificada a compresión del concreto,  $\text{kg/cm}^2$

$f_c^\circ$  : Resistencia nominal a compresión del concreto,  $\text{kg/cm}^2$

$F_r$  : Factor de reducción

$f_y$  : Esfuerzo de fluencia del acero,  $\text{kg/cm}^2$

$A_c$  : Area de la sección transversal total del concreto,  $\text{cm}^2$

$A_g$  : Idem  $A_c$

$A_s$  : Area del acero de refuerzo,  $\text{cm}^2$

Documentación experimental confirma el uso del factor 0.85 para concreto de alta resistencia, por lo que se pueden utilizar las expresiones de diseño empleadas para concretos de más baja resistencia.

#### b. EFECTOS DEL ACERO DE CONFINAMIENTO

En elementos estructurales donde la compresión domina el diseño, como en columnas, es ventajoso confinar al concreto proporcionando acero lateral en forma de espirales continuas. Los efectos benéficos del confinamiento lateral del concreto sobre el comportamiento de la columna son:

1. Incrementa la resistencia del núcleo de concreto dentro de la espiral, por su confinamiento contra la expansión lateral bajo carga.

2. Incrementa la capacidad de deformación axial del concreto, de modo que permite una falla gradual y dúctil.

La práctica común de proporcionar confinamiento dada por el ACI 318 y el DDF sugiere que

$$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}$$

donde

$\rho_s$  : Relación de volumen de refuerzo en espiral a volumen del núcleo de concreto

$A_g$  : Area total de la sección de concreto

$A_c$  : Area del núcleo de concreto

$f'_c$  : Resistencia a compresión del concreto

$f_y$  : Esfuerzo de fluencia del acero en espiral

### c. CARGA REPETIDA

El concreto de alta resistencia está relativamente libre de microagrietamiento interno, aún cerca de la carga última, cuando se carga monotónicamente. Por otro lado, se sabe que el concreto de alta resistencia es más frágil que el concreto de baja resistencia.

Para hacer recomendaciones de diseño sobre este tema, se requiere investigación adicional para el concreto de alta resistencia, con y sin confinamiento, sujeto a varios

regimenes de carga repetida.

d. CARGA SOSTENIDA

En muchas estructuras, el concreto está sujeto a carga sostenida. Las deformaciones dependiente del tiempo y los esfuerzos asociados tienen un efecto decisivo sobre el comportamiento estructural. Tales deformaciones están directamente relacionadas con las deflexiones a largo plazo, pérdidas en fuerzas de presfuerzo y agrietamiento. La resistencia de las columnas se puede reducir debido a carga sostenida de alta intensidad. Se puede también incrementar debido a la capacidad de las estructuras de concreto de redistribuir por si mismo el sobreesfuerzo a través de la deformación diferida.

La deformación diferida se puede describir en términos del coeficiente

$$C_c = \frac{\text{deformación en el tiempo}}{\text{deformación elástica inicial}}$$

o por el coeficiente de deformación diferida específico (coeficiente unitario de deformación diferida).

δ como deformación diferida por esfuerzo unitario

Los dos pueden relacionarse a través del módulo de elasticidad. Hay concordancia general de que la deformación diferida del concreto de alta resistencia es significativamente menor que la correspondiente al concreto de más baja resistencia.

### 6.2.2. VIGAS Y LOSAS

Las vigas de alta resistencia pueden comportarse de acuerdo a las reglas que se emplean para describir el comportamiento de vigas hechas de concreto de más baja resistencia.

#### a. DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DE COMPRESION

La distribución de esfuerzos de compresión en vigas está relacionado directamente a la forma de la curva esfuerzo-deformación en compresión uniaxial.

El ACI 318 y el DDF sugieren, basado en el block rectangular de esfuerzos que la resistencia a flexión nominal de una viga simplemente apoyada puede ser calculada por

$$M_n = A_s f_y d \left( 1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (\text{ACI 318})$$

$$M_n = F_r A_s f_y d \left( 1 - 0.5 \rho \frac{f_y}{f''_c} \right) \quad (\text{DDF 87})$$

$$f'_c = 0.85 f''_c$$

$$f''_c = f'_c \left( 1.05 - \frac{f'_c}{1250} \right)$$

donde

$M_n$  : Momento resistente nominal en la sección, en kg-cm

$A_s$  : Area de refuerzo en tensión, en  $\text{cm}^2$

- $f_y$  : Esfuerzo de fluencia especificada del refuerzo, en  $\text{kg/cm}^2$
- $d$  : Distancia de la fibra de compresión extrema al centroide del refuerzo en tensión, en cm
- $\rho$  : Proporción de refuerzo en tensión
- $F_r$  : Factor de reducción
- $f_c^*$  : Resistencia nominal a compresión del concreto,  $\text{kg/cm}^2$
- $f_c'$  : Resistencia a compresión especificada del concreto, en  $\text{kg/cm}^2$

El método ACI 318 y DDF 87 puede ser usado sin cambios, al menos para concretos de hasta  $800 \text{ kg/cm}^2$ .

#### b. DEFORMACION MAXIMA

Mientras que el concreto de alta resistencia alcanza su máximo esfuerzo a una deformación por compresión ligeramente mayor que la correspondiente a un concreto de más baja resistencia, la deformación última es menor para concreto de alta resistencia. Sin embargo, el valor constante de deformación de 0.003 prescrita por el ACI 318 y el DDF representa satisfactoriamente resultados experimentales para concretos de alta resistencia, así como para concretos de más baja resistencia.

#### c. PORCENTAJE MINIMO DE ACERO EN TENSION

Con los módulos de rotura tomados como  $3.10 \sqrt{f_c'}$  se puede

mostrar que

$$\rho_{\min} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c}}{f_y} > / \frac{14}{f_y} \text{ en kg/cm}^2 \quad (\text{ACI y DDF})$$

será una ecuación apropiada para todas las resistencias de concreto entre 200 a 800 kg/cm<sup>2</sup>.

#### d. CAPACIDAD EN CORTANTE

La práctica común, para diseño por cortante está basada en factores de carga. La resistencia total al corte está formada por dos partes:  $V_v$  proporcionada por los estribos y  $V_c$ , la contribución nominal del concreto. La contribución nominal del concreto incluye, la del concreto aún sin agrietar, la resistencia proporcionada por la trabazón del agregado en la cara de la grieta diagonal hipotética y la resistencia de las barras de refuerzo principal.

El concreto de alta resistencia cargado uniaxialmente en compresión se fractura repentinamente y siendo así, puede formar una superficie de falla que es lisa y casi un plano, en contraste a la característica de falla rugosa de los concretos de más baja resistencia.

Las grietas de tensión diagonal en vigas de concreto de alta resistencia puede esperarse que tenga una superficie lisa, probablemente por una deficiencia en la trabazón del agregado. Resultados de ensayos efectuados en la Universidad de Connecticut, indican que la trabazón del agregado disminuye a medida que aumenta la resistencia del concreto. Entonces, puede producirse una resistencia al corte menor, ya que las

ecuaciones de diseño no lo toman en cuenta.

e. ADHERENCIA, LONGITUD DE ANCLAJE Y DESARROLLO

Ninguna investigación con información suficiente ha sido obtenida para permitir recomendaciones.

f. AGRIETAMIENTO

El módulo de rotura, que es la medida apropiada de la resistencia a tensión del concreto para usarse en la predicción de la carga de agrietamiento en ensayos de flexión es  $3.10 \sqrt{f'_c}$ , según ACI 318,  $2.0 \sqrt{f'_c}$  (DDF) concretos de baja resistencia y  $2.88 \sqrt{f'_c}$  (en este estudio) (valor medio), en  $\text{kg/cm}^2$ .

g. DEFORMACIONES ELASTICAS

Las principales incertidumbres en las predicciones de las deformaciones elásticas de vigas de concreto reforzado son (a) módulo elástico  $E_c$ ; (b) módulo de rotura  $f_r$ ; y (c) momento de inercia efectivo, el cual depende de la extensión de las grietas en la viga.

Para los módulos elásticos puede usarse

$$E_c = 10600 \sqrt{f'_c} + 70300 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{ACI 318})$$

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{DDF 87}) \text{ bajas resistencias}$$

$$E_c = 14300 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{este estudio})$$

$400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$



Para la predicción del módulo de rotura puede usarse el valor

$$f_r = 3.10 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (ACI 318)}$$

$$f_r = 2.00 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (DDF 87)} \quad 200 < f'_c < 400 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_r = 2.88 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (este estudio) } 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{(valor medio)}$$

La ecuación para el momento de inercia efectivo  $I_e$  incluida en el ACI y en el del DDF es

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left( \left( 1 - \frac{M_{cr}}{M_a} \right) \right)^3 I_{cr}$$

donde

$M_{cr}$  : Momento de agrietamiento

$M_a$  : Momento máximo

$I_g$  : Momento de inercia de la sección completa

$I_{cr}$  : Momento de inercia de la sección transformada agrietada

Este momento de inercia proporciona la base para el cálculo de la deflexión de la viga, aunque para mayor seguridad para concretos de alta resistencia debe verificarse.

#### h. DEFLEXIONES DEPENDIENTE DEL TIEMPO

Las deflexiones dependiente del tiempo de vigas debido a

deformación diferida y contracción por secado son calculadas por la aplicación de factores a deflexiones elásticas calculadas. Este procedimiento es válido para miembros de concretos de alta resistencia, pero la información experimental indica que los factores pueden ser significativamente menores, debido a la deformación diferida más baja de los concretos de alta resistencia.

De acuerdo al ACI 318 y al DDF, las deflexiones adicionales a largo plazo son obtenidas usando el siguiente factor (fig 16)

$$\frac{\xi}{1 + 50 \rho'} \quad ( \text{ACI} )$$

$$\frac{2}{1 + 50 \rho'} \quad ( \text{DDF} )$$

donde

$\rho'$  : Porcentaje de refuerzo en compresión no presforzado

$\xi$  : Factor dependiente del tiempo (Gráfica del ACI 318R)

#### i. CARGA REPETIDA

Parece que el concreto de alta resistencia, debido a la relativa inexistencia de microagrietamiento interno bajo carga de servicio, debería ser más resistente a carga repetida. Se tiene poca información acerca de vigas de concreto de alta resistencia sujetas a carga repetida.

## 7. APLICACIONES

El concreto de alta resistencia puede y ha sido utilizado a través de algunos años con éxito en trabajos especiales.

De acuerdo con los trabajos realizados en otros países con concretos de alta resistencia, las aplicaciones que le han sido asignadas a esta clase de concreto son:

a. En la obtención de alta resistencia a edad temprana, para permitir una rápida transmisión del esfuerzo del acero de presfuerzo al concreto o, alternativamente, para permitir un rápido desmolde de elementos prefabricados.

b. En la elaboración de unidades prefabricadas, segmentos, durmientes, y pilas de concreto reforzados y presforzados.

c. En la producción de concretos de alto revenimiento con una relación agua/cemento baja.

d. En concreto de alta resistencia última, con el fin de permitir que dichos concretos soporten grandes cargas en su aplicación final.

e. En elementos de concreto presforzado procesados en autoclave.

f. En columnas y muros de cortante de edificios de gran altura (rascacielos).

g. En estructuras donde la durabilidad (baja porosidad) es crítica.

h. Para construir o reparar áreas que requieran pronto uso,

por ejemplo, reparar caminos de ciudades o para pistas de aeropuertos.

Es obvio que el concreto de alta resistencia plantea ciertas ventajas como:

- a. Se puede obtener mayor resistencia de diseño.
- b. Se puede introducir mayores presfuerzos en el concreto de alta resistencia, y se puede evitar la destrucción del concreto durante la entrega y manipulación.
- c. La mayor reducción de agua acelera el endurecimiento del concreto y puede facilitar la temprana introducción del presfuerzo.
- d. Con la alta resistencia, la sección transversal de la estructura puede reducirse. La reducción en la sección transversal da como resultado la disminución de la carga muerta de una estructura, lo cual es favorable para edificios altos, puentes de gran claro y para la estabilidad bajo la acción de sismos. La reducción de peso también contribuye a diseños económicos de diferentes estructuras sin sacrificar buenas propiedades del concreto.
- e. Debido a la estabilidad química, se requiere mucho menos mantenimiento para puentes de concreto que para puentes de acero, y la durabilidad es mayor con menos mantenimiento.
- f. La trabajabilidad mejorada así como la baja relación agua/cemento mejora también la impermeabilidad del concreto.

Información recabada a través del tiempo demuestra que, se han utilizado con éxito concretos trabajables para secciones

prefabricadas altamente reforzadas para el Estadio Olimpico de Montreal, donde se especificó un concreto de resistencia a compresión de  $420 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días, alcanzándose en obra  $490 \text{ kg/cm}^2$ .

En Estados Unidos se han usado con buenos resultados para producir columnas prefabricadas de alta resistencia en edificaciones como, el edificio Dravo (Denver, Colorado) el cual consta de 10 niveles, donde se utilizó aditivos superfluidificantes para lograr resistencias en el concreto del orden de los  $500 \text{ kg/cm}^2$  en columnas prefabricadas, y en vigas prefabricadas para puentes donde se utilizaron aditivos superfluidificantes con el fin de lograr una resistencia al desmolde de  $387 \text{ kg/cm}^2$  en 16 horas.

Otros ejemplos de construcción de concretos de alta resistencia incluye, el Puente Willows en Toronto donde se obtuvieron resistencias alrededor de  $700 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días; en la Terminal del Aeropuerto O'Hare (Chicago), un concreto de  $560 \text{ kg/cm}^2$  fué requerido en la viga presforzada del techo; para los contenedores del reactor nuclear en Inglaterra y Francia, fueron especificadas resistencias del concreto entre  $500$  y  $600 \text{ kg/cm}^2$ ; y para el Puente del Parque Highland en Kingston Road en Toronto, se alcanzó una resistencia de  $560 \text{ kg/cm}^2$ .

La aplicación más importante del concreto de alta resistencia ha sido en columnas de edificios de gran altura. Se han construido más de 20 edificios en el área de Chicago con columnas que tienen una resistencia a compresión de  $620 \text{ kg/cm}^2$ . Se han reportado otras aplicaciones en New York, Houston, Minneapolis y Melbourne, Australia.

Otras aplicaciones del concreto de alta resistencia ha sido en

vigas de puentes prefabricadas presforzadas. Sin embargo, la información publicada sobre estructuras reales es limitada.

Quizá la aplicación más importante en los Estados Unidos es un puente entre Huntington, West Virginia, y Proctorville, Ohio. Para esta obra se especificó una resistencia a compresión de  $550 \text{ kg/cm}^2$ . El puente consiste de una superestructura con un claro principal de 300 m .

También se han reportado, el uso de concreto con resistencia a compresión hasta  $760 \text{ kg/cm}^2$  en puentes ferroviarios en Japón.

En 1948, se usó un concreto con una resistencia a compresión de  $620 \text{ kg/cm}^2$  en paneles prefabricados para una casa de máquinas en Fort Peck Dam, Montana.

El uso de concreto de  $690 \text{ kg/cm}^2$  para postes de concreto presforzado ha sido descrito por Skrastins en 1970. El concreto de alta resistencia fué seleccionado para reducir el tamaño de los postes.

La mayoría de las aplicaciones del concreto de alta resistencia han usado la propiedad de resistencia del material. Sin embargo, el concreto de alta resistencia puede poseer otras características, como un alto módulo de elasticidad, rápido descimbrado en losas, que podrían ser usadas ventajosamente en estructuras de concreto.

Finalmente, la relación entre el concreto de alta resistencia y su alta calidad puede hacer atractivo al concreto de alta resistencia no por su resistencia sino por su rendimiento a largo plazo.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. El cemento tipo II Puzolánico presentó mejores características de desarrollo de resistencia, medida mediante cubos de mortero.
2. Los agregados ideales para el desarrollo de la presente investigación fueron la arena andesítica y grava caliza. Estudios previos confirman la selección de estos materiales.
3. Se obtuvo una resistencia compresión de  $912 \text{ kg/cm}^2$  a 3 horas de colado para un material de cabeceo, preparado a base de la combinación de 40% de polvo de arena andesítica (pasa malla 100) y 60% de azufre.
4. El consumo óptimo de cemento, en combinación con los materiales empleados y para efectos de alcanzar altas resistencias a compresión, es del orden de  $400 \text{ kg/m}^3$ .
5. La relación arena/grava de 48/52, empleada en los respectivos diseños de mezcla, presentaron las mejores características tanto en estado fresco como en el estado endurecido.
6. El peso volumétrico de las mezclas de concreto con incorporación del aditivo superfluidificante presentó un incremento del orden del 2%.
7. El contenido de aire de las mezclas de concreto con incorporación del aditivo superfluidificante no presentó variación.

8. Se obtuvieron reducciones de agua del orden de 30% mediante la incorporación del aditivo superfluidificante.

9. Hay un mayor desarrollo de resistencia a compresión a primeras edades en los concretos de alta resistencia.

10. Existe una relación promedio de 1.06 entre las resistencias a compresión de ensayos en cilindros de 10 x 20 cm y 15 x 30 cm, independientemente de la edad de ensaye.

11. La resistencia a compresión más elevada alcanzada a 56 días de edad fué de 920 kg/cm<sup>2</sup>.

12. En las mezclas de concreto que siguen ganando resistencia con cemento puzolánico a través del tiempo, como es el caso del concreto de alta resistencia, es más conveniente especificar la resistencia de diseño hasta los 90 días de edad.

13. Se encontró una relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión de

$$f_f = 2.88 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (valor medio)} \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_f = 2.12 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (valor límite inferior)}$$

$$400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

14. Se encontró una relación entre la resistencia de tensión y la resistencia a compresión de

$$f_T = 1.85 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (valor medio)} \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$



$$f_T = 1.69 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \text{ (valor limite inferior)}$$

$$400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

15. La expresión que relaciona el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión es

$$E_c = 14300 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \quad 400 < f'_c < 900 \text{ kg/cm}^2$$

16. Se encontró un valor promedio para la relación de Poisson del orden de 0.20.

17. La expresión promedio que relaciona la resistencia a compresión a una edad cualquiera con la alcanzada a 28 días de edad, es (fig 17)

$$F_c = \frac{t}{4.3 + 0.8t} F'_c$$

18. La expresión promedio que permite calcular la contracción por secado de las mezclas de concreto estudiadas es

$$c = \frac{t^{0.99}}{39.7 + t^{0.99}} 5.15 \times 10^{-4}$$

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario continuar con la investigación en el campo del concreto de alta resistencia, con otros tipos de cemento y aditivos. El presente estudio no pretende cubrir todos los aspectos relacionados con los concretos de alta resistencia, pero sí los más importantes.
2. Los elementos estructurales normalmente no reciben su carga total antes de 90 días, por lo que es permisible especificar resistencias a compresión a 56 ó 90 días, en lugar de las edades convencionales de 28 días. Esto es importante para concretos de alta resistencia hechos con cementos puzolánicos, los cuales continúan ganando resistencia aún después de 90 días. Así la resistencia del concreto podría definirse como aquella a 90 días y no a los 28 días de edad.
3. Es necesario contar con un laboratorio competente para diseñar la mezcla de concreto de alta resistencia y lograr un control de calidad adecuado en obra.
4. Para obtener concreto de alta resistencia será necesario el uso de aditivos reductores de agua. Se recomienda que al seleccionar el tipo de aditivo se investigue su eficacia.
5. Se recomienda trabajar con revenimientos bajos.
6. Seleccionar el tamaño máximo del agregado para lograr la mejor trabajabilidad y resistencia de la mezcla con la mínima relación agua/cemento y el menor consumo de cemento. Con frecuencia agregados gruesos de 20 mm (3/4") proporciona un buen funcionamiento. Puede afirmarse que, en mezclas ricas de cemento (aquellas que tienen suficiente pasta para cubrir todas las partículas) si se disminuye el tamaño máximo del agregado

grueso, aumenta tanto la superficie específica del agregado como la adherencia entre mortero y agregado, con lo cual se incrementa en forma sustancial la resistencia potencial del concreto.

7. Las condiciones reales de obra y los requerimientos del proyecto, rara vez reproducen el ambiente ideal de un laboratorio utilizado para evaluar mezclas con aditivos superfluidificantes. Muchos de estos aditivos son susceptibles de una rápida pérdida de revenimiento a temperatura alta. Una pérdida de revenimiento repentina o un tiempo de fraguado reducido pueden causar serios problemas, por eso debe efectuarse un programa de pruebas para determinar el procedimiento correcto de mezclado, así como los materiales adecuados para las condiciones de la obra. Para minimizar este problema se recomienda distribuir o incorporar el aditivo inmediatamente antes de descargar el concreto.

8. Puesto que la relación agua/cemento es el factor más importante que afecta la resistencia del concreto, la producción del concreto de alta resistencia normalmente requerirá el uso de relaciones bajas. Obviamente hay necesidad de alcanzar una buena compactación. Si la compactación se hace por vibración, es importante que se prolonge lo suficiente para producir la máxima compactación, sin segregación.

9. Los usuarios de aditivos y especialmente de aditivos superfluidificantes deben emplearlos con buen juicio. Con el objeto de evitar posibles problemas, es indispensable observar cuidadosamente los procedimientos recomendables para la obra en cuestión.

La apropiada fabricación del concreto con incorporación de

superfluidificantes requiere de habilidad y experiencia adecuadas. Se debe dar especial consideración al hecho de que el efecto superfluidificante inmediatamente después de finalizado el mezclado puede ser influenciado no sólo por el tipo de superfluidificante o por su dosificación, sino también por las propiedades del cemento, la graduación del agregado, las proporciones de mezcla, la temperatura del concreto fresco, y el tiempo durante el proceso de mezclado, en el cual el superfluidificante es añadido.

También, sería interesante investigar si el superfluidificante empleado puede ser usado en conjunto con otros aditivos para obtener otras propiedades específicas. Estas y otras investigaciones deben llevarse al cabo para una determinación total de las ventajas económicas inherentes al uso de superfluidificantes en la fabricación de concretos de alta resistencia.

10. Existe una necesidad real de continuar obteniendo información confiable a partir de pruebas, particularmente en lo relativo a los efectos de largo plazo de los concretos con superfluidificantes.

## AGRADECIMIENTOS

1. Al M. en I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por haberme permitido participar en el desarrollo del presente proyecto, y además por su asesoramiento y minuciosa revisión de la tesis.
2. Al Ing. Alberto Fuentes Gonzalez, por su colaboración en las diversas etapas del presente proyecto, y por su participación en todas las pruebas de laboratorio y procesado de información.
3. Al Dr. Mario Zermeño de León, por su preocupación por el desarrollo del presente trabajo, y sobretodo por su amistad.
4. Al Ing. Mario Montero Catalán, por su colaboración en la realización de este trabajo.
5. A los Srs. Francisco Reyes Morán, José Rosales, Concepción Hernández y Salomón Trinidad, por su valiosa colaboración en la realización de las pruebas de laboratorio, sin la cual no hubiese sido posible culminar este trabajo.
6. A la UNAM y DEPTI, que me permitieron alcanzar una de mis metas y por haber compartido buenos momentos con amigos de diferentes nacionalidades.
7. Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, que me brindó la oportunidad de realizar este trabajo, y en especial por que me dió la oportunidad de conocer muchos y muy buenos amigos, a quienes recordaré siempre con mucha alegría.
8. Al Ing. Julio Pindter Vega, por su tutoría durante mis estudios de posgrado, y en especial por su amistad.

A Todos ... GRACIAS

## REFERENCIAS

1. "State of the Art Report on High Strength Concrete", ACI Journal/July-August 1984
2. "Superplasticizing admixtures in concrete", Publication No. 45030, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1976
3. "Superplasticizers in Concrete", SP-62, American Concrete Institute, Detroit, 1979
4. Malhotra, V. M., "Superplasticizers: Their effect on fresh and hardened concrete", Concrete International/May 1981
5. "High Strength Concrete", SP-121, American Concrete Institute, Detroit, 1990
6. Blick, R. L., "Some factores influencing high strength concrete", Modern Concrete, Vol. 36 No. 12, April 1973
7. "Concreto de alta resistencia", Revista IMCYC, Vol. 22, Num. 164/Diciembre/1984
8. "Tentative Interim Report on High Strength Concrete", ACI Journal/September 1967
9. Burgess, A. J.; Ryell, J.; and Bunting, J., "High Strength Concrete for the Willows Bridge", ACI Journal/August 1970
10. Mendoza, C. J.; Mena, M., "Influencia de los agregados en los concretos estructurales del Distrito Federal", Revista IMCYC, Vol. 25, Num. 192/Mayo/1987

11. "High Strength Concrete", Concrete International/October 1987
12. Calzado, C. R., "Aditivos para concreto", Revista IMCYC, Vol. 21, Num. 151/Noviembre/1983
13. "Developments in the Use of Superplasticizers", SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981
14. Hester, W. T., "Aditivos de alta capacidad reductores de agua", Revista IMCYC, Vol. 17, No. 101/septiembre/1979
15. Shah, S. P., "High Strength Concrete - A Workshop Summary", Concrete International/May 1981
16. "Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete", SP-119, American Concrete Institute, Detroit, 1989
17. Grassa, J. M., "Concreto con superfluidificantes", Revista IMCYC, Vol. 22, Num. 162/Octubre/1984
18. "High Strength Concrete", SP-87, American Concrete Institute, Detroit, 1985
19. Zia. P., "Review of ACI Code for Design with High Strength Concrete", Concrete International/August 1983

TABLA 1. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS

CEMENTO		$\frac{a}{c}$	Fluidez	Compresión, kg/cm <sup>2</sup> edad de ensaye (días)				
I	Tipo			7	14	28	45	60
A	I	0.658	97	186	222	251	273	283
B	I	0.658	89	208	226	270	296	311
C	II Mod	0.702	108	220	249	280	310	325
D	I Puz	0.688	109	196	234	262	283	297
E	I Puz	0.744	105	166	202	240	273	289
F	I Puz	0.700	105	171	195	221	250	269
G	II Puz	0.688	114	199	239	290	320	326

I : Identificación

a/c : Relación agua/cemento, en peso



TABLA 2. AGREGADOS

CONCEPTOS	GRAVA NATURAL		
	% IND	% ACUM	
Ret. 6"			
" 3"			
" 1 1/2"			
" 3/4"	42.85	42.85	
" 3/8"	56.15	99.00	
" No.4	1.00	100.00	
	ARENA NATURAL		
Ret. No.8	15.70	15.70	Material que pasa la
" No.16	16.50	32.20	mallá 200 : 18.10%
" No.30	16.30	48.50	% Absorc : 2.4%
" No.50	14.30	62.80	PVSS : 1609 kg/m <sup>3</sup>
" No.100	11.70	74.50	PVSC : 1779 kg/m <sup>3</sup>
" Charola	25.50	100.00	Densidad : 2.47
M.F.		2.34	

TABLA 2. CONTINUACION

CONCEPTOS	GRAVA PROCESADA		
	% IND	% ACUM	
Ret. 6"			T.M. : 3/4"
" 3"			% Absorc. : 0.92 %
" 1 1/2"			PVSS : 1481 kg/m <sup>3</sup>
" 3/4"	0.00	0.00	PVSC : 1580 kg/m <sup>3</sup>
" 3/8"	55.70	55.70	Densidad : 2.65
" No.4	44.30	100.00	
	ARENA PROCESADA		
Ret. No.8	22.20	22.20	Material que pasa la
" No.16	19.90	42.10	mallá 200 : 1.12%
" No.30	20.90	63.00	% Absorc : 3.47%
" No.50	18.10	81.10	PVSS : 1478 kg/m <sup>3</sup>
" No.100	12.80	93.90	PVSC : 1606 kg/m <sup>3</sup>
" Charola	6.10	100.00	Densidad : 2.46
M.F.		3.02	

TABLA 3. CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS YA ACONDICIONADOS

CARACTERISTICAS	A. FINO ARENA ANDESITICA	A. GRUESO GRAVA CALIZA
Módulo de Finura	3.02	6.56
Superficie Especifica	47.70 cm <sup>2</sup> /gr	2.80 cm <sup>2</sup> /gr
Densidad	2.46	2.56
Porcentaje de Absorción	3.47%	0.92%
Pesos Volumétricos :		
Suelto	1478 kg/m <sup>3</sup>	1481 kg/m <sup>3</sup>
Compactado	1606 kg/m <sup>3</sup>	1580 kg/m <sup>3</sup>
Material que pasa la Malla No. 200	1.12%	-----
Impurezas Orgánicas	No existe	No existe

TABLA 4. MEZCLAS PRELIMINARES

Cemento	: Tipo II Modificado Identificación C		
	Consumo : 425 kg/m <sup>3</sup>		
Arena/grava	: 47/53		
Mezcla	1	14	15
cemento kg/m <sup>3</sup>	424	423	425
sacos/m <sup>3</sup>	8.48	8.46	8.50
arena kg/m <sup>3</sup>	789	807	827
grava kg/m <sup>3</sup>	874	934	1004
agua lt/m <sup>3</sup>	182	165	124
% Sikament	0.00	0.36	1.67
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	1.30	6.10
red. agua %	0.00	9.30	31.90
a/c	0.429	0.390	0.292
f/g	47/53	46/54	45/55
reven. cm	8.00	0.50	0.00
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2301.30	2365.92	2419.98
% aire	2.40	----	----
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	376	519	746
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	468	575	775
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	506	621	797

TABLA 4. CONTINUACION

Cemento : Tipo II Modificado Identificación G Consumo : 425 kg/m <sup>3</sup> Arena/grava : 47/53			
Mezcla	3	7	8
cemento kg/m <sup>3</sup>	426	422	430
sacos/m <sup>3</sup>	8.52	8.44	8.60
arena kg/m <sup>3</sup>	791	769	837
grava kg/m <sup>3</sup>	877	934	1016
agua lt/m <sup>3</sup>	183.00	163.42	136.50
% Sikament	0.00	0.31	1.56
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	1.10	5.80
red. agua %	0.00	10.20	25.40
a/c	0.429	0.387	0.317
f/g	47/53	45/55	45/55
reven. cm	3.00	2.80	----
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2310.00	2326.36	----
% aire	2.50	2.35	----
f <sub>c</sub> <sup>'14</sup> kg/cm <sup>2</sup>	363	449	701
f <sub>c</sub> <sup>'28</sup> kg/cm <sup>2</sup>	444	496	767
f <sub>c</sub> <sup>'56</sup> kg/cm <sup>2</sup>	447	514	785

TABLA 4. CONTINUACION

		Cemento : Tipo II Puzolánico Identificación G Consumo : 425 kg/m <sup>3</sup> Arena/grava : 50/50			
Mezcla	5	16	17	19	
cemento kg/m <sup>3</sup>	428	427	417	415	
sacos/m <sup>3</sup>	8.56	8.54	8.34	8.30	
arena kg/m <sup>3</sup>	806	838	869	866	
grava kg/m <sup>3</sup>	869	902	937	933	
agua lt/m <sup>3</sup>	175.00	158.18	122.30	122.30	
% Sikament	0.00	0.40	2.51	2.00	
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	1.50	9.00	7.10	
red. agua %	0.00	9.60	30.10	30.10	
a/c	0.408	0.370	0.293	0.295	
f/g	48/52	48/52	48/52	48/52	
reven. cm	3.00	1.00	0.50	0.00	
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2314.37	2361.79	2387.23	2376.10	
% aire	2.40	----	----	----	
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	394	562	782	703	
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	444	610	844	773	
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	473	680	920	869	

TABLA 5. MEZCLAS PRELIMINARES

		Cemento : Tipo II Modificado Identificación C Consumo : 675 kg/m <sup>3</sup> Arena/grava : 40/60			
Mezcla	2	10	12	9	
cemento kg/m <sup>3</sup>	657	681	686	686	
sacos/m <sup>3</sup>	13.14	13.62	13.72	13.72	
arena kg/m <sup>3</sup>	545	554	580	558	
grava kg/m <sup>3</sup>	881	895	938	903	
agua lt/m <sup>3</sup>	208.00	197.50	179.40	201.30	
% Sikament	0.00	0.53	1.13	1.10	
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	3.10	6.60	6.50	
red. agua %	0.00	5.00	13.80	3.20	
a/c	0.316	0.290	0.261	0.293	
f/g	38/62	38/62	38/62	38/62	
reven. cm	6.25	2.00	2.00	22.00	
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2318.30	2357.02	2413.62	2379.59	
% aire	2.05	----	----	----	
f <sub>c</sub> <sup>14</sup> kg/cm <sup>2</sup>	473	675	742	677	
f <sub>c</sub> <sup>28</sup> kg/cm <sup>2</sup>	594	681	776	707	
f <sub>c</sub> <sup>56</sup> kg/cm <sup>2</sup>	600	776	812	823	

TABLA 5. CONTINUACION

Cemento : Tipo II Puzolánico Identificación G Consumo : 675 kg/m <sup>3</sup> Arena/grava : 40/60			
Mezcla	4	11	13
cemento kg/m <sup>3</sup>	657	685	679
sacos/m <sup>3</sup>	13.14	13.70	13.58
arena kg/m <sup>3</sup>	545	557	574
grava kg/m <sup>3</sup>	883	901	928
agua lt/m <sup>3</sup>	208.00	198.90	178.00
% Sikament	0.00	0.60	1.28
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	3.50	7.50
red. agua %	0.00	4.40	14.40
a/c	0.316	0.290	0.262
f/g	38/62	38/62	38/62
reven. cm	2.50	3.00	3.30
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2318.18	2371.33	2389.77
% aire	2.10	----	----
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	458	658	791
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	535	745	838
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	543	775	854



TABLA 5. CONTINUACION

	Cemento : Tipo II Puzolánico Identificación G Consumo : 675 kg/m <sup>3</sup> Arena/grava : 50/50			
Mezcla	6	18	20	22
cemento kg/m <sup>3</sup>	654	670	676	841
sacos/m <sup>3</sup>	13.08	13.40	13.52	16.82
arena kg/m <sup>3</sup>	679	706	712	580
grava kg/m <sup>3</sup>	731	759	766	624
agua lt/m <sup>3</sup>	211.00	182.70	183.90	243.80
% Sikament	0.00	1.22	2.00	2.00
lt/m <sup>3</sup> sik	0.00	7.00	11.60	14.40
red. agua %	0.00	13.40	13.40	0.00
a/c	0.322	0.272	0.272	0.290
f/g	48/52	48/52	48/52	48/52
reven. cm	2.70	4.60	5.00	0.00
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2303.09	2351.93	2373.23	2319.49
% aire	2.15	----	----	----
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	471	784	774	767
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	567	847	840	849
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	588	904	878	887

TABLA 6. MEZCLAS PRELIMINARES

Cemento : Tipo II ,Puzolánico						
Identificación G						
Consumo : Varios						
Arena/grava : 48/52						
Aditivo : 2%						
Mezcla	21	23	24	19	20	22
cemento kg/m <sup>3</sup>	227	273	329	415	676	841
sacos/m <sup>3</sup>	4.54	5.46	6.58	8.30	13.52	16.82
arena kg/m <sup>3</sup>	930	896	895	866	712	580
grava kg/m <sup>3</sup>	1002	965	963	933	766	624
agua lt/m <sup>3</sup>	115.20	119.80	119.60	122.30	183.90	243.80
% Sikament	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
lt/m <sup>3</sup> sik	4.00	4.70	5.60	7.10	11.60	14.40
red. agua %	0.00	0.00	0.00	30.10	13.40	0.00
a/c	0.507	0.439	0.363	0.295	0.272	0.290
f/g	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52
reven. cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2316.31	2333.80	2349.70	2376.10	2373.23	2319.49
% aire	----	----	----	----	----	----
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	401	385	507	703	774	767
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	452	429	578	773	840	849
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	495	482	610	869	878	887

TABLA 7. MEZCLAS DEFINITIVAS

Cemento : Tipo II Puzolánico Identificación G Consumo : Varios Arena/grava : 48/52 Aditivo : 2.5%						
Mezcla	A	B	C	D	E	F
cemento kg/m <sup>3</sup>	428	300	350	400	500	550
sacos/m <sup>3</sup>	8.56	6.00	7.00	8.00	10.00	11.00
arena kg/m <sup>3</sup>	806	940	917	888	836	796
grava kg/m <sup>3</sup>	896	1009	984	953	897	854
agua lt/m <sup>3</sup>	175.00	117.25	119.10	126.00	134.35	150.03
% Sikament	----	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
lt/m <sup>3</sup> sik	----	6.50	7.50	8.60	10.80	11.85
a/c	0.408	0.390	0.340	0.310	0.270	0.270
f/g	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52
reven. cm	5.00	0.50	0.50	0.00	0.00	6.00
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2299.00	2352.00	2365.00	2361.00	2374.00	2377.00
% aire	2.50	2.00	1.30	1.40	1.90	1.80
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	418	368	534	568	734	726
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	466	376	546	598	737	777
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	510	430	569	611	813	791
f' <sub>c</sub> 90 kg/cm <sup>2</sup>	539	451	599	709	838	887

TABLA 8. RESISTENCIA A COMPRESION DE MATERIALES PARA CABECEO

MEZCLA			
AZUFRE	OTROS MATERIALES		RESISTENCIA A COMPRESION kg/cm <sup>2</sup>
100%		---	420
80%	Ceniza	20%	440
90%	Ceniza	10%	441
90%	Ceniza	10%	220
70%	Ceniza	30%	498
95%	Ceniza	5%	266
75%	Polvo Arena Silica	25%	528
75%	Arcilla Roja	25%	400
75%	Polvo Arena D.F.	25%	558
75%	Ceniza	25%	443
75%	Polvo Arena D.F. Pasada por Malla No. 200	25%	648
60%	Polvo Arena D.F. Pasada por Malla No. 100	40%	912
75%	Polvo Arena D.F. Pasada por Malla No. 200	25%	379
67%	Polvo Arena D.F. Pasada por Malla No. 100	33%	726

TABLA 9. INFLUENCIA DEL ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE EN EL PESO VOLUMETRICO DE MEZCLAS DE CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

MEZCLA No.	PESO VOLUMETRICO kg/m <sup>3</sup>	PROMEDIO kg/m <sup>3</sup>	RELACION -----
1* 14 15	2301.30 2365.92 2419.98	2301.30  2392.95	  1.04
3* 7 8	2310.80 2326.36 -----	2310.80  2326.36	  1.01
2* 10 12	2318.30 2357.02 2413.62	2318.30  2385.32	  1.03
4* 11 13	2318.18 2371.33 2389.77	2318.28  2380.55	  1.03
5* 16 17	2314.37 2361.79 2387.23	2314.37  2374.51	  1.02
6* 8	2303.09 2351.93	2303.09 2351.93	1.02

\* Concretos sin aditivo

TABLA 10. PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

	A	B	C	D	E	F
PESO VOLUMETRICO kg/m <sup>3</sup>	2299	2352	2365	2361	2374	2377
REVENIMIENTO cm	5	0.5	0.5	0.0	0.0	6
TIEMPO Ve Be segs	-	6	5	6	6	-
CONTENIDO DE AIRE %	2.5	2.0	1.3	1.4	1.9	1.8

TABLA 11. COMPARACION ENTRE PESOS VOLUMETRICOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE MEZCLAS DE CONCRETO.

IDENTIFICACION	P.V.f. <sub>s</sub> kg/m <sup>3</sup>	P.V.e. <sub>s</sub> kg/m <sup>3</sup>	$\frac{P.V.e.}{P.V.f.}$
A	2299	2352	1.02
B	2352	2393	1.02
C	2365	2414	1.02
D	2361	2385	1.01
E	2374	2398	1.01
F	2377	2413	1.01

P.V.e.: PESO VOLUMETRICO EN ESTADO ENDURECIDO

P.V.f.: PESO VOLUMETRICO EN ESTADO FRESCO

TABLA 12. RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESION A 14 Y 56 DIAS RESPECTO DE 28 DIAS DE EDAD DE MEZCLAS DE CONCRETO CON Y SIN ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE

MEZCLA	$\frac{f'_{c14d}}{f'_{c28d}}$	PROMEDIO	$\frac{f'_{c56d}}{f'_{c28d}}$	PROMEDIO
1 <sup>*</sup>	0.803	0.803	1.081	1.081
14	0.903		1.080	
15	0.962	0.932	1.028	1.054
3 <sup>*</sup>	0.817	0.817	1.007	1.007
7	0.905		1.036	
8	0.914	0.909	1.023	1.029
2 <sup>*</sup>	0.796	0.796	1.010	1.010
10	0.991		1.139	
12	0.956	0.973	1.046	1.092
4 <sup>*</sup>	0.856	0.856	1.025	1.015
11	0.883		1.040	
13	0.943	0.913	1.019	1.029
5 <sup>*</sup>	0.887	0.887	1.065	1.065
16	0.921		1.116	
17	0.926	0.923	1.090	1.103
6 <sup>*</sup>	0.831	0.831	1.037	1.037
18	0.926	0.926	1.067	1.067

\* Concretos sin aditivo

TABLA 13. INFLUENCIA DEL CONSUMO DE CEMENTO EN LA RESISTENCIA A COMPRESION

Cemento : Tipo II , Puzolánico Identificación G Consumo : Varios Arena/grava : Varios Aditivo : Varios					
Mezcla	17	13	18	20	22
cemento kg/m <sup>3</sup>	417	679	670	676	841
sacos/m <sup>3</sup>	8.34	13.58	13.40	13.52	16.82
% Sikament	2.51	1.28	1.22	2.00	2.00
lt/m <sup>3</sup> sik	9.00	7.50	7.00	11.60	14.40
red. agua %	30.10	14.40	13.40	13.40	----
a/c	0.293	0.262	0.272	0.272	0.290
f/g	48/52	38/62	48/52	48/52	48/52
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	782	791	784	774	767
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	844	838	847	840	849
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	920	854	904	878	887



TABLA 14. MAXIMAS RESISTENCIAS A COMPRESION ALCANZADAS PARA LA  
 MAXIMA REDUCCION DE AGUA  
 Contenido de cemento :425 kg/m<sup>3</sup>

Identificación	II Mod C	II Puz G	II Puz G
Mezcla	15	8	17
cemento kg/m <sup>3</sup>	425	430	417
sacos/m <sup>3</sup>	8.50	8.60	8.34
arena kg/m <sup>3</sup>	827	837	869
grava kg/m <sup>3</sup>	1004	1016	937
agua lt/m <sup>3</sup>	124.00	136.50	122.30
% Sikament	1.67	1.56	2.51
lt/m <sup>3</sup> sik	6.10	5.80	9.00
red. agua %	31.90	25.40	30.10
a/c	0.292	0.317	0.293
f/g	45/55	45/55	48/52
reven. cm	0.00	----	0.50
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2419.98	----	2387.23
% aire	----	----	----
f' <sub>c</sub> 14 kg/cm <sup>2</sup>	746	701	782
f' <sub>c</sub> 28 kg/cm <sup>2</sup>	775	767	844
f' <sub>c</sub> 56 kg/cm <sup>2</sup>	797	785	920

TABLA 14. CONTINUACION  
 Contenido de cemento : 675 kg/m<sup>3</sup>

Identificación	II Mod C	II Puz G	II Puz G
Mezcla	12	13	18
cemento kg/m <sup>3</sup>	686	679	670
sacos/m <sup>3</sup>	13.72	13.58	13.40
arena kg/m <sup>3</sup>	580	574	706
grava kg/m <sup>3</sup>	938	928	759
agua lt/m <sup>3</sup>	179.40	178.00	182.70
% Sikament	1.13	1.28	1.22
lt/m <sup>3</sup> sik	6.60	7.50	7.00
red. agua %	13.80	14.40	13.40
a/c	0.261	0.262	0.272
f/g	38/62	38/62	48/52
reven. cm	2.00	3.30	4.60
p.v. kg/m <sup>3</sup>	2413.62	2389.77	2351.93
% aire	----	----	----
f <sub>c</sub> '14 kg/cm <sup>2</sup>	742	791	784
f <sub>c</sub> '28 kg/cm <sup>2</sup>	776	838	847
f <sub>c</sub> '56 kg/cm <sup>2</sup>	812	854	904

TABLA 15. COMPARACION ENTRE LA RESISTENCIA DE DISEÑO Y LA RESISTENCIA REAL OBTENIDA.

CILINDROS 6" X 12"						
$f'_c$ diseño kg/cm <sup>2</sup>	475	475	625	725	850	850
IDENTIFICACION	A	B	C	D	E	F
Contenido de Cemento kg/m <sup>3</sup>	428	300	350	400	500	550
% Sikament	0.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Relación a/c	0.41	0.39	0.34	0.31	0.27	0.27
Proporción f/g	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52	48/52
Revenimiento cm	5.0	0.5	0.5	0.0	0.0	6.0
$f'_c$ 14 días	418	368	534	568	734	726
$f'_c$ 28 días	466	376	546	598	737	777
$f'_c$ 28 días $\frac{f'_c}{f'_c \text{ diseño}}$ (%)	98.10	79.15	87.36	82.48	86.70	91.41
$f'_c$ 56 días	510	430	560	611	813	791
$f'_c$ 90 días	539	451	599	709	838	887
$f'_c$ 90 días $\frac{f'_c}{f'_c \text{ diseño}}$ (%)	113.5	95.0	96.0	98.0	99.0	104.0
CILINDROS 4" X 8"						
$f'_c$ 14 días	435	411	560	578	762	737
$f'_c$ 28 días	469	420	573	609	765	789
$f'_c$ 28 días $\frac{f'_c}{f'_c \text{ diseño}}$ (%)	98.74	88.42	91.68	84.00	90.00	92.82
$f'_c$ 56 días	545	480	609	633	844	838
$f'_c$ 90 días	579	494	721	721	881	863
$f'_c$ 90 días $\frac{f'_c}{f'_c \text{ diseño}}$ (%)	121.9	104.0	115.4	99.4	103.6	101.5

TABLA 16. RESISTENCIA A COMPRESION EN FUNCION DE  $f'_c$  28 DIAS

Mezclas	A	B	C	D	E	F
14 días	0.90	0.98	0.98	0.95	0.99	0.93
28 días	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
56 días	1.09	1.14	1.04	1.02	1.10	1.02
90 días	1.16	1.20	1.10	1.18	1.14	1.14

TABLA 17. PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Mezclas	A	B	C	D	E	F
<b>COMPRESION</b>						
kg/cm <sup>2</sup>						
14 días	418	368	534	568	734	726
28 días	466	376	546	598	737	728
56 días	510	430	569	611	813	791
90 días	539	451	599	709	838	887
<b>FLEXION</b>						
kg/cm <sup>2</sup>						
28 días	63	46	61	68	93	89
$\frac{f'_f}{f'_c}$ (%)	13.50	12.20	11.20	11.40	12.60	11.40
<b>TENSION</b>						
kg/cm <sup>2</sup>						
28 días	38	35	45	48	49	52
$\frac{f'_t}{f'_c}$ (%)	8.10	9.30	8.20	8.00	6.60	6.70
<b>MODULO ELASTICO</b>						
kg/cm <sup>2</sup>						
28 días	280049	419768	316016	357726	397801	358939
56 días	315150	347150	433401	421585	338124	372673
90 días	325501	273916	198177	410036	433362	344001
<b>RELACION DE POISSON</b>						
28 días	--	--	--	0.21	0.20	--

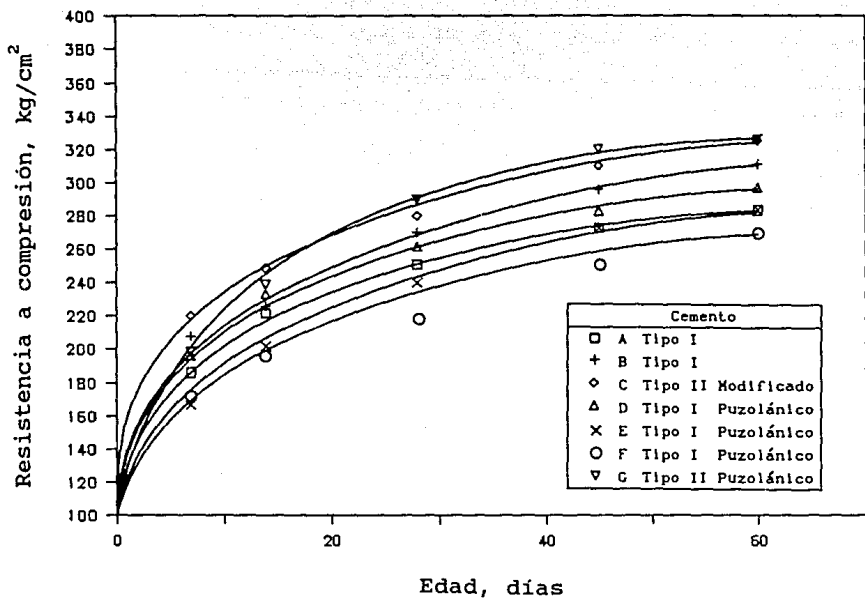


Fig 1 Resistencia a compresión de cementos

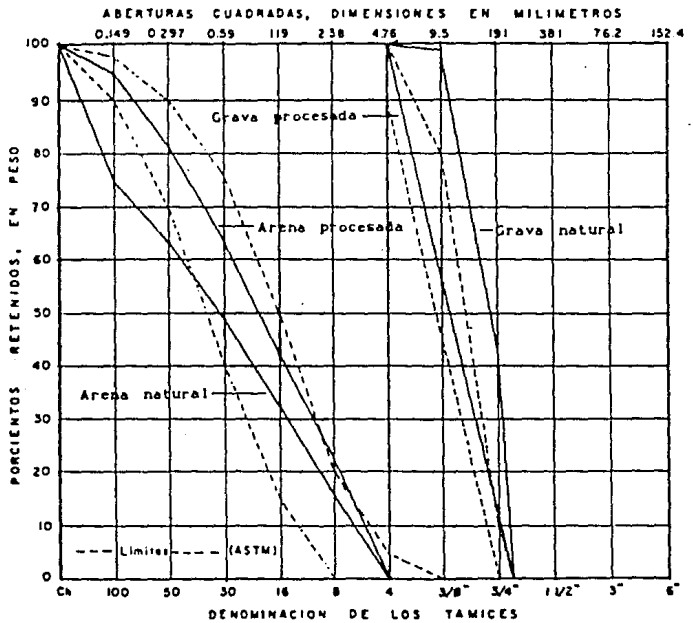


Fig 2 Curvas granulométricas

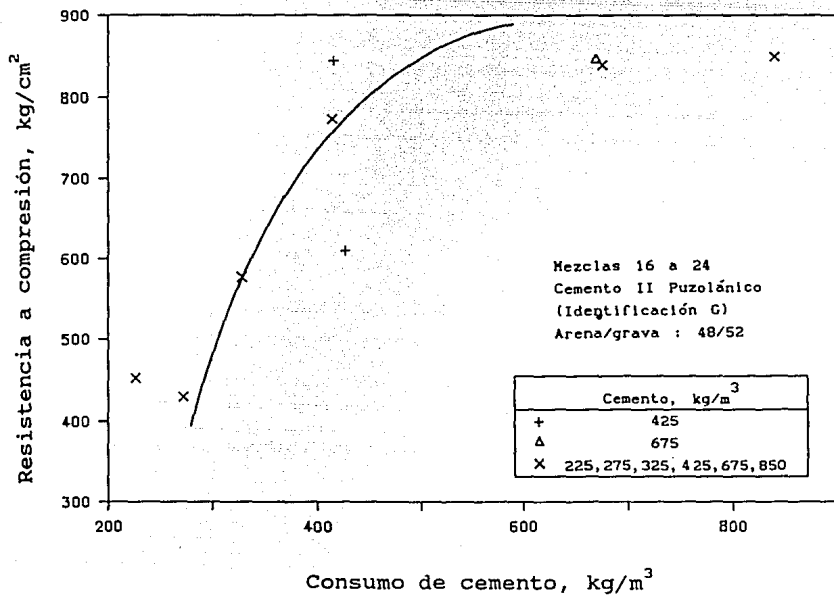


Fig 3 Influencia del consumo del cemento en la resistencia a compresión, a 28 días de edad. Mezclas preliminares

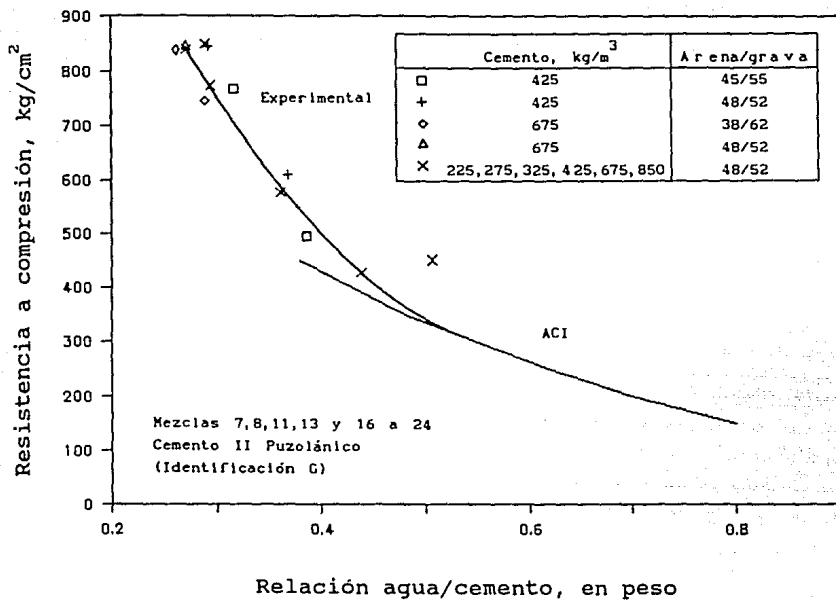


Fig 4 Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a compresión, a 28 días de edad. Mezclas preliminares



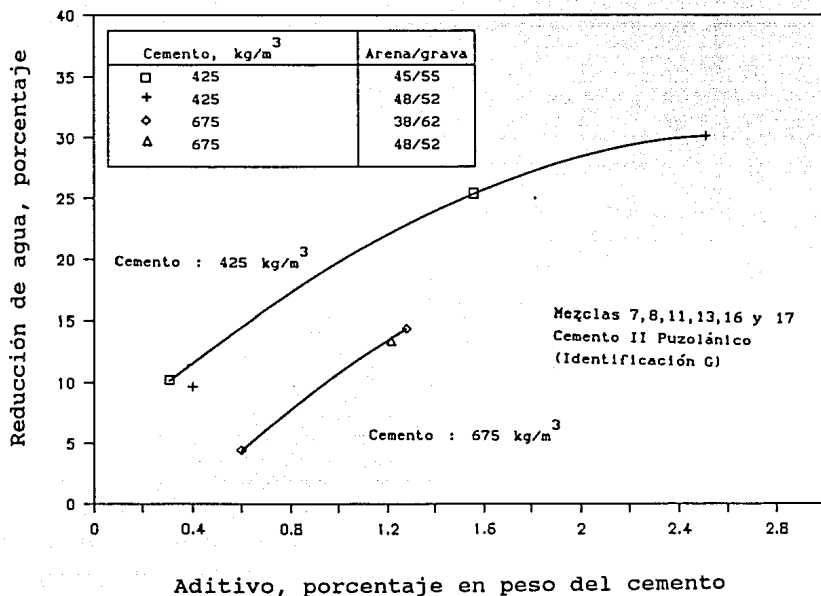


Fig 5 Influencia del consumo del aditivo superfluidificante en la reduccion de agua.  
Mezclas preliminares

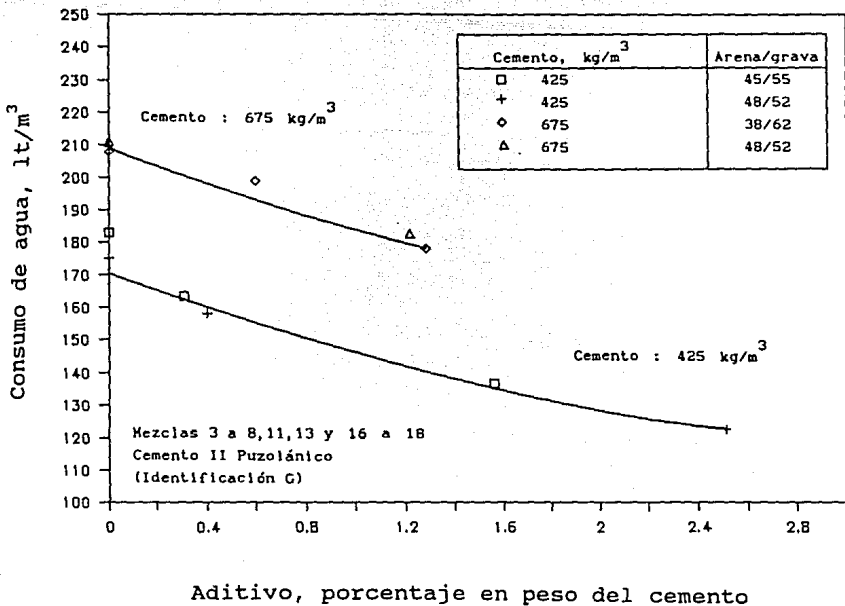


Fig 6 Influencia del consumo del aditivo superfluidificante en el consumo de agua.  
Mezclas preliminares

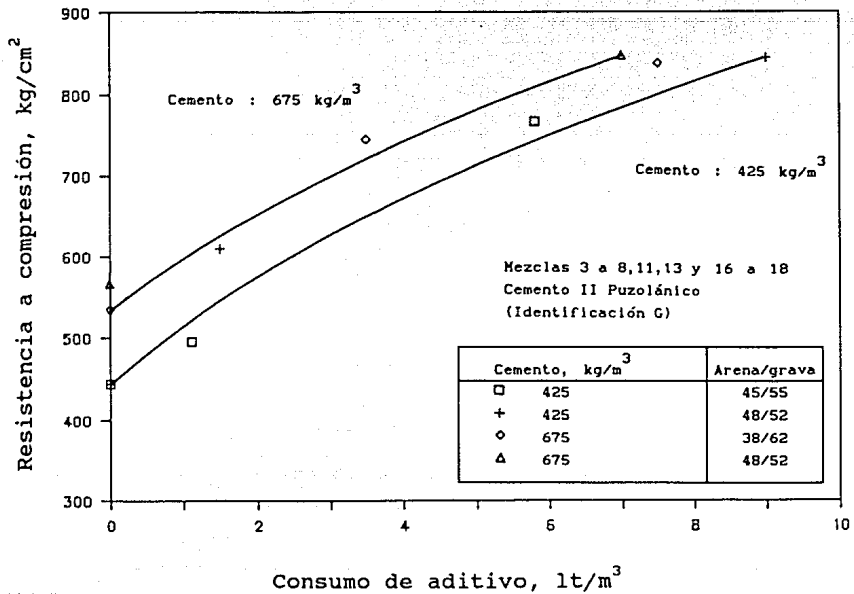


Fig 7 Influencia del consumo del aditivo superfluidificante en la resistencia a compresión, a 28 días de edad.  
Mezclas preliminares

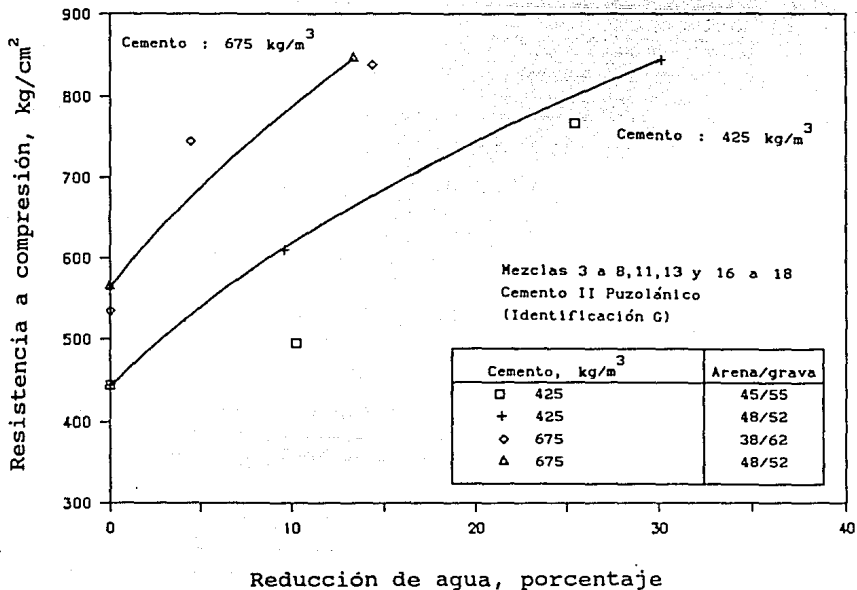


Fig 8 Influencia de la reducción de agua en la resistencia a compresión, a 28 días de edad. Mezclas preliminares

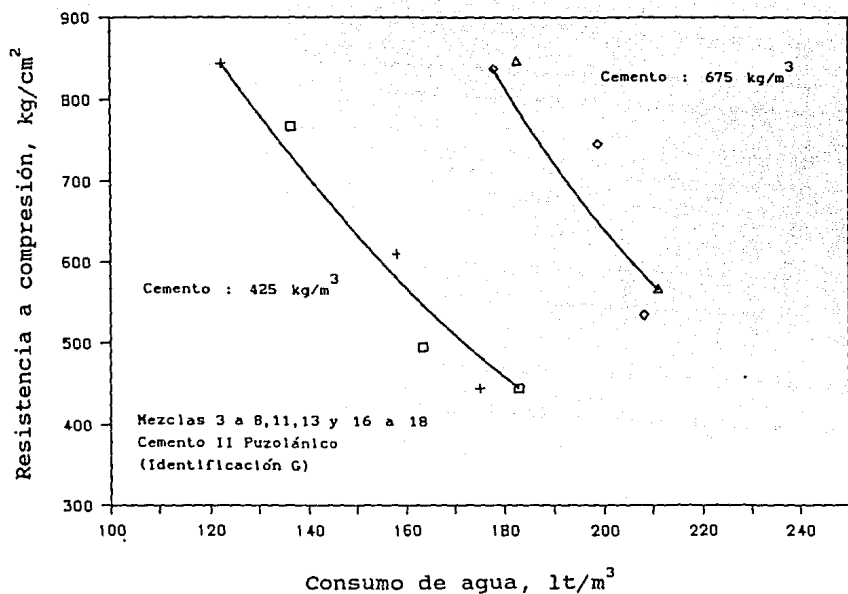


Fig 9 Influencia del consumo de agua en la resistencia a compresión, a 28 días de edad.  
Mezclas preliminares

Cemento, $\text{kg/m}^3$	Arena/grava
□ 425	45/55
+ 425	48/52
◇ 675	38/62
△ 675	48/52

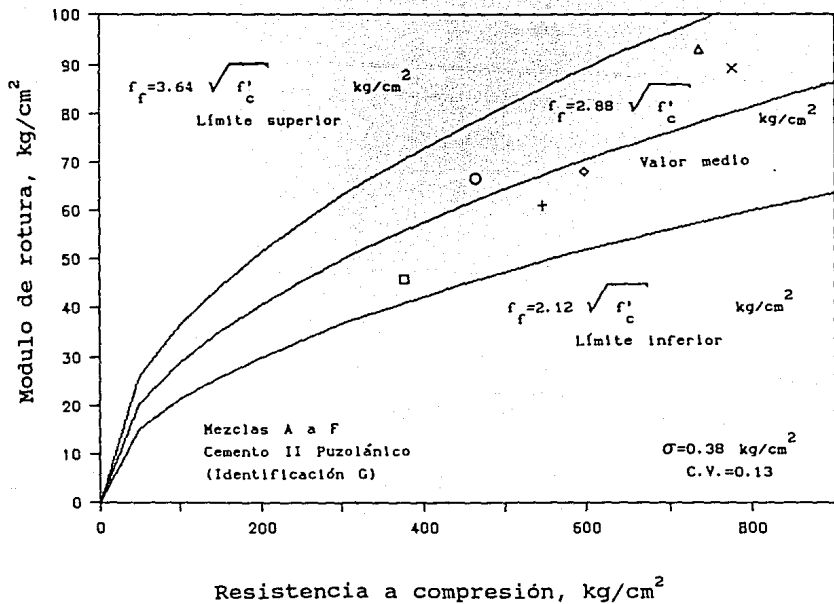


Fig 10 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión, a 28 días de edad. Mezclas definitivas

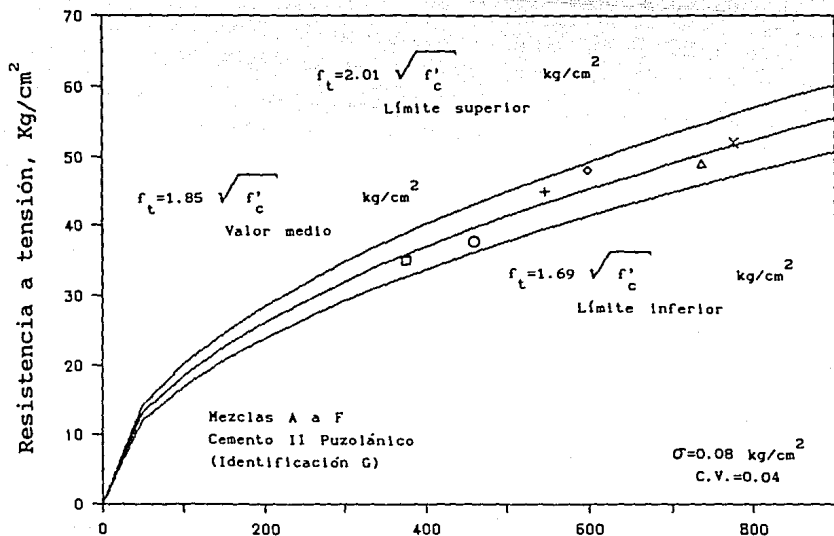


Fig 11 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tensión, a 28 días de edad. Mezclas definitivas

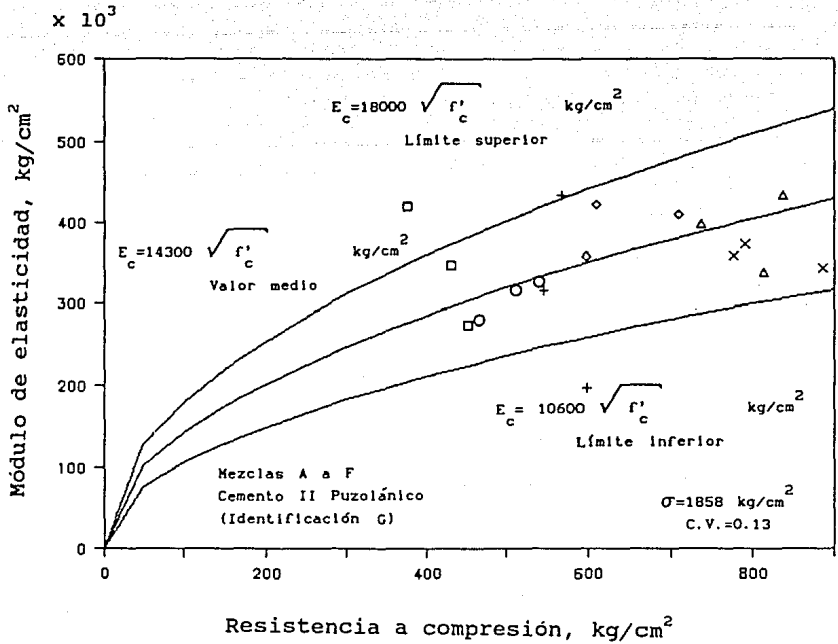


Fig 12 Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión.  
 Mezclas definitivas



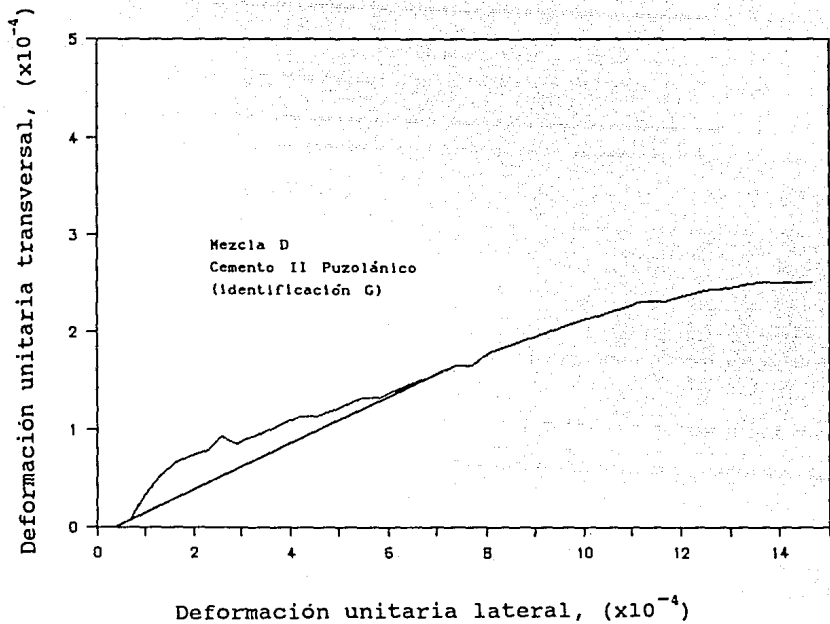


Fig 13 Relación de Poissón

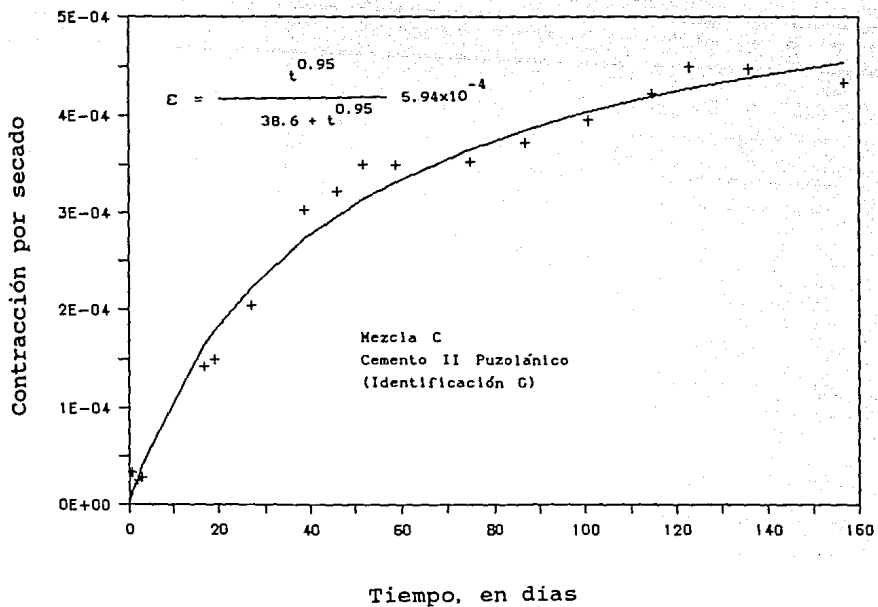


Fig 14 Contracción por secado

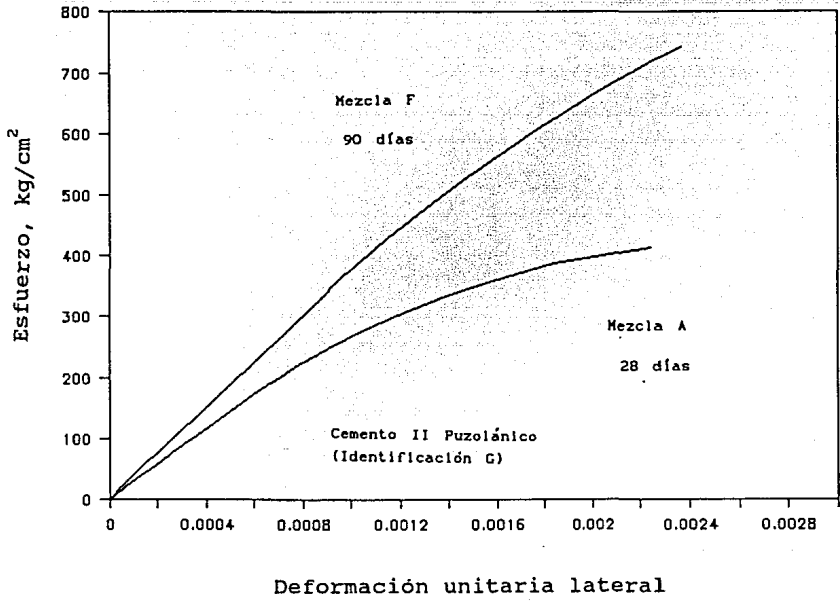


Fig 15 Gráfica esfuerzo vs deformación

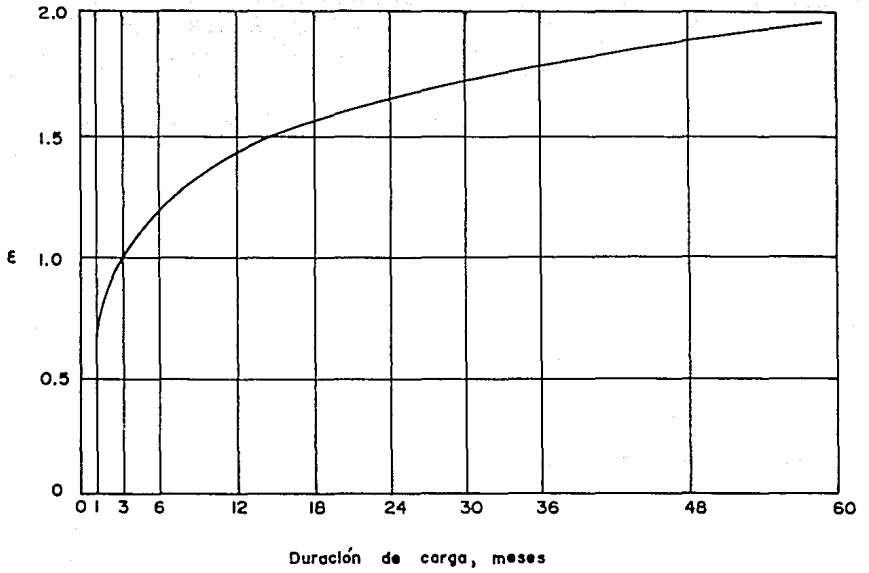


Fig 16 Multiplicador para deflexiones de largo plazo

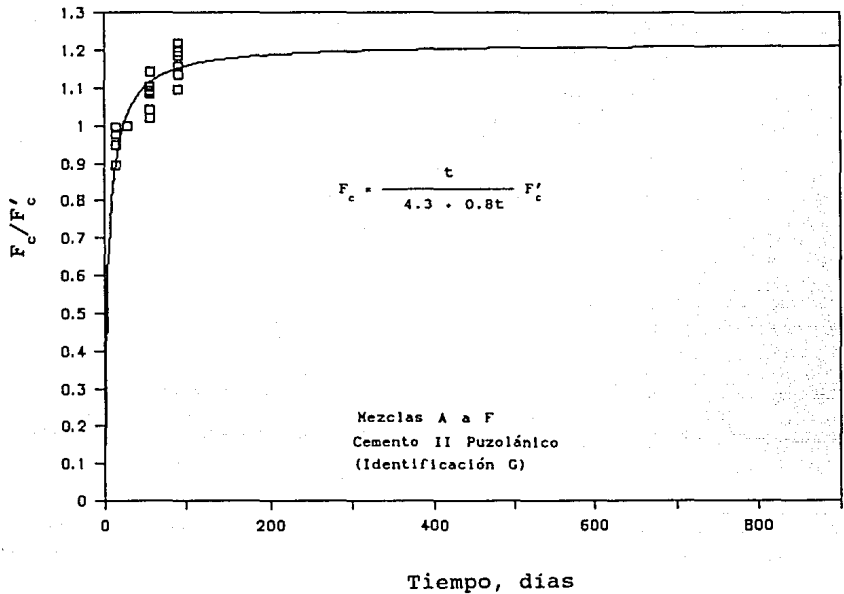


Fig 17 Variación de la resistencia a compresión a través del tiempo