

8 870115  
2ej  
**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA**

Incorporada a la Universidad Nacional Autónoma de México

**ESCUELA DE INGENIERIA**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS EFECTOS MICRO Y  
MACRO-ESTRUCTURALES DE LOS SUPERFLUIDIFICANTES EN EL  
CONCRETO Y PASTAS DE CEMENTO PORTLAND**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**LORENA MARGARITA LIMON GONZALEZ**

**GUADALAJARA, JALISCO, 1985.**



## **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.

## INDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCION	3
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	6
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	48
4. EFECTOS SOBRE EL CONCRETO	65
a) EN ESTADO PLASTICO	65
b) EN ESTADO ENDURECIDO	67
5. PRUEBAS EN PASTAS	70
a) EN ESTADO PLASTICO	70
b) EN ESTADO ENDURECIDO	77
6. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	87
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA	95
TABLAS Y FIGURAS	

## RESUMEN

El trabajo presenta el análisis y conclusiones de un estudio experimental desarrollado como tema de tesis, cuyo objetivo principal fue el de relacionar el comportamiento del concreto del cemento tipo portland en estado plástico y endurecido, con la microestructura de la pasta de cemento modificada por la presencia de aditivos superfluidificantes, así como un estado del arte, que describe y discute los resultados de investigaciones reportados en una selección de artículos publicados entre 1960 y 1984.

La metodología para estudiar la influencia del por ciento de aditivo sobre el comportamiento de concretos y pastas de cemento tipo portland con relaciones agua-cemento de 0.35 y 0.45 y de 0.25 a 0.50, respectivamente, para edades de prueba entre 1 y 90 días se describe en detalle, de igual manera se exponen las observaciones que pueden servir para explicar las modificaciones en las propiedades de las mezclas de concreto y pastas de cemento tanto en estado plástico como endurecido.

En función de los resultados experimentales se propone -- una familia de curvas que optimiza el contenido de aditivo superfluidificante en función de la resistencia mecánica y al intemperismo, tiempo de fraguado, calor de hidratación, fluidez,

temperatura ambiente y costo, según la relación agua-cemento - que se requiera para una aplicación particular.

Finalmente, se hacen comentarios sobre el aporte de este trabajo al conocimiento de la forma en que actúan y los efectos de los aditivos superfluidificantes sobre el comportamiento del concreto de cemento tipo portland a corto y largo plazo, así como de las ventajas y desventajas que presenta el uso de estos productos en la industria de la construcción desde los puntos de vista técnico y económico.

## 1.- INTRODUCCION

A partir de 1960, con el objeto de producir concretos de alta resistencia mecánica y baja relación agua-cemento para la industria de prefabricados, Japón comienza a utilizar grandes cantidades de un aditivo, desarrollado por investigadores de ese país, que actualmente se conoce como superfluidificante o reductor de agua de alto rango y como su nombre lo indica, la función principal de este producto es la de incrementar sustancialmente la fluidez de las mezclas de concreto.

La necesidad de producir concretos de alta bombeabilidad, fluidez, compacidad y autonivelantes sin incrementar los contenidos de agua y cemento en las mezclas, ni generar segregación y/o sangrado promueve, en 1972, entre los países europeos el uso de aditivos superfluidificantes. Por razones semejantes, entre 1978 y 79 la industria de prefabricación y construcción de Estados Unidos y Canadá comienza a emplear este tipo de producto.

La novedad del producto y su capacidad para reducir el contenido de agua en las mezclas de concreto, así como la posibilidad de disminuir el consumo de cemento sin detrimento de la resistencia ni de la trabajabilidad, para una misma relación agua-cemento, despertó el interés de los investigadores, por lo que se promovió la realización de varios estudios orientados

tados principalmente a la determinación de los efectos del aditivo sobre las propiedades del concreto "superfluidificado".

Al efectuar una revisión preliminar de la bibliografía -- disponible, se observó que la mayoría de los artículos tratan sobre el ahorro en tiempo de vibrado, problemas de pérdida de fluidez en función del tiempo, mejoras en la compactación y adquisición de resistencia mecánica, posibilidad de producir concretos con resistencia a la compresión superior a los 900 kg/cm a edad temprana y estudios relacionados con la durabilidad del material al ataque por sulfatos y a ciclos de congelación y deshielo.

Se pensó que desde el punto de vista académico sería atractivo investigar la influencia de estos aditivos sobre el proceso de hidratación del cemento tipo portland y conocer los cambios microestructurales de las pastas que explicaran el comportamiento, a nivel macroscópico, descrito en la literatura.

Con el fin de conocer lo que se ha publicado sobre la influencia de los superfluidificantes en el proceso de hidratación, se hizo una segunda búsqueda de artículos. Se encontró que algunos autores han investigado el efecto de estos aditivos sobre las propiedades físicas y químicas, durante la hidratación, de los compuestos del cemento por separado y preparados con alto grado de pureza en el laboratorio, en especial el

sistema  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ , así como las modificaciones que se producen en los sistemas  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  y  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  en el momento de hidratarse, la temperatura que se genera, la reología de las pastas y medidas de variación del potencial ( zeta ).

Algunas de estas publicaciones explican, en función de -- las pruebas que describen, la acción dispersante y por qué se pierde la fluidez con el tiempo, pero no hacen comentarios, a nivel microestructura, que expliquen las mejoras observadas en las propiedades mecánicas ni por qué las dosis excesivas deterioran la calidad del concreto. Tampoco dejan claro la razón -- por la que la fluidez se pierde con el tiempo. Existe un artículo muy breve que intenta aclarar algunas contradicciones, en -- tre otros dos autores, a partir de unas cuantas pruebas y medidas de capilaridad y agua de cristalización relacionadas con -- la resistencia a la compresión de pastas de cemento.

Debido a la cantidad de dudas, contradicciones y falta de información sobre las modificaciones que los aditivos super---fluidificantes producen en la hidratación del cemento y los as -- pectos microestructurales de las pastas, que expliquen el comportamiento físico y mecánico del concreto con aditivos de este tipo, se decidió hacer un estudio experimental que comple---mentara la información disponible.



## 2.- REVISION BIBLIOGRAFICA

Se considera importante, para los objetivos, de este tesis, exponer algunos conceptos básicos sobre la naturaleza del concreto de cemento tipo portland, de la composición del cemento, de la pasta de cemento y, especialmente, del proceso de hidratación que permitan una mejor comprensión tanto de la literatura revisada como del trabajo experimental.

### 2.1.- Naturaleza del concreto

El nombre "concreto" se le da a un "material compuesto", el cual consiste de una matriz aglomerante y de un aglomerado, generalmente partículas o fragmentos de rocas relativamente inertes. En el caso del concreto del cemento tipo portland, el aglomerante o matriz, tanto en estado plástico como endurecido, es una combinación de agua y cemento tipo portland, que en la práctica se conoce como "pasta de cemento". Al aglomerado se le llama "agregado". Como característica principal se puede mencionar que sus partículas se gradúan por tamaño, desde arena fina hasta fragmentos de roca, que en algunos tipos de concreto pueden alcanzar varios centímetros de diámetro.

Desde el punto de vista práctico, el proporcionamiento de los componentes principales de una mezcla de concreto, el cementante y el agregado, están en función de tres factores:

Primero, que en estado plástico la mezcla sea trabajable y fácil de colocar, segundo, que al endurecer tenga la resistencia mecánica y las características de durabilidad adecuadas al tipo de servicio y exposición de diseño y tercero, que el costo del producto final sea el mínimo aceptable de acuerdo a la calidad requerida.

En un metro cúbico de concreto, el agregado ocupa un espacio igual a tres cuartas partes, el volumen restante lo llena la pasta de cemento y el aire, generalmente atrapado entre partículas y que aún después de una compactación cuidadosa su volumen varía, para el promedio de los concretos estructurales comunes, entre el 1 y el 2.5 por ciento.

La pasta de cemento, que es el componente activo del concreto, tiene dos funciones principales: la primera, llenar los huecos entre las partículas de agregado, proporcionando lubricación en estado plástico e impermeabilidad en estado endurecido y la segunda, brindar al sistema la resistencia mecánica -- que caracteriza al concreto. Las propiedades de la pasta endurecida dependen del tipo de cemento, de la relación agua-cemento y de qué tan completa sea la combinación química entre el agua y el cemento, a este proceso químico se le conoce con el nombre de "hidratación", que para efectuarse requiere de tiempo, temperatura favorable y la presencia de humedad. Al lapso durante el cual se le proporciona temperatura y humedad al con

creto se le llama "período de curado", que en la obra varía entre 3 y 14 días y en el laboratorio se extiende hasta 28 días o más según el propósito.

El agregado tiene tres funciones principales: primero, -- brindar un relleno relativamente barato, segundo proporcionar una masa de partículas capaces de resistir las cargas aplicadas, el desgaste, la percolación de humedad y la acción de la intemperie, y el tercero, reducir los cambios volumétricos, resultado de los procesos de fraguado y endurecimiento así como los debidos a variaciones en el contenido de humedad de la pasta de cemento.

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas que un concreto puede llegar a exhibir, como resultado del uso de un agregado en particular dependen de las características minerales superficiales y geométricas de las partículas, de la adherencia con la matriz cementante, de la granulometría y de la cantidad de agregado por volumen unitario de concreto.

## 2.2.- Naturaleza del cemento tipo portland

Desde el punto de vista construcción, se llama " cemento " a un material capaz de desarrollar las características de adhesividad y cohesividad que le permiten aglomerar fragmentos de roca, una vez que se han efectuado las reacciones químicas ---

apropiadas. De entre la variedad de materiales cementantes que existen a disposición del ingeniero, el más importante, para fines estructurales, es el cemento hidráulico silicocalcáreo, - se le llama hidráulico por su capacidad para endurecer y adquirir resistencia bajo el agua y silicocalcáreo porque sus componentes principales son el silicio y el calcio.

El nombre genérico de "portland" se debe a que en 1824, - Joseph Aspdin, un ladrillero inglés, obtuvo una patente para fabricar piedras artificiales, a su producto le puso el nombre de "cemento portland" por el color semejante al de las canteras de la isla de Portland.

#### 2.2.1.- Manufactura del cemento tipo portland

El cemento tipo portland tiene como ingredientes principales calcio, silicio, aluminio y hierro, que afortunadamente -- abundan en la naturaleza en forma de calizas y arcillas.

El proceso de manufactura es relativamente sencillo, aunque presenta como desventaja principal la necesidad de calcinar la materia prima a temperaturas cercanas a 1500°C. Existen dos procesos, uno húmedo y otro seco; en el primero se muelen, pulverizan y mezclan en agua, las rocas calizas y arcillas en la proporción adecuada, en el segundo se pulverizan y se mezclan en una corriente de aire. La mezcla, húmeda o seca, se --

vierte de manera continúa y regulada en un horno rotatorio, el cual tiene una pendiente que está en función de su longitud.

Conforme la mezcla desciende por el horno su temperatura se incrementa. Al principio se evapora el agua libre y después se descompone el carbonato de calcio, produciendo óxido de calcio y bióxido de carbono, al final del horno se produce la fusión, a 1500°C, de las materias primas, cuya combinación forma principalmente, silicatos de calcio y aluminatos de calcio así como pequeñas cantidades de otros compuestos, a este conjunto se le llama clinker, que una vez frío se pulveriza, se mezcla con un poco de sulfato de calcio y se envasa para su distribución como cemento portland.

#### 2.2.1.1.- Composición química

La composición química del cemento tipo portland es difícil de establecer, debido a la presencia de impurezas, la determinación de los compuestos principales es prácticamente imposible de hacer por medio de los métodos químicos convencionales, por lo que en general se acepta que los componentes principales se estimen a partir del análisis cuantitativo de los óxidos de cemento, como el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), el de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ) y el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ).

Para estimar los compuestos principales del cemento se -- utilizan las fórmulas de "Bogue", así, se acepta que el cemento está constituido por cuatro compuestos principales que son:

Silicato tricálcico $3CaO \cdot SiO_2$	en forma abreviada	$C_3S$
Silicato dicálcico $2CaO \cdot SiO_2$	"	$C_2S$
Aluminato tricálcico $3CaO \cdot Al_2O_3$	"	$C_3A$
Ferroaluminato tetracálcico $4CaO \cdot Al_2O_3 : Fe_2O_3$		$C_4AF$

Es común que, en la literatura que trata sobre la química del cemento, los autores emplean la misma terminología que usaron los primeros investigadores cuando, por medio del microscopio petrográfico, establecieron diferencias morfológicas entre las "fases" o minerales del cemento. Así, por desconocer su -- composición, cuatro de estos minerales recibieron los nombres de "alita", "belita", "celita" y "felita".

En la actualidad, debido a estudios de equilibrio de fase, difracción de rayos-x, análisis térmico y otros, se conoce que la "alita" es el  $C_3S$ , la "belita" y "felita" son dos formas -- cristalinas del  $C_2S$  y que la "celita" es lo que hoy se denomina "fase ferrita", la cual se considera una solución sólida y cuya composición varía entre  $C_2S$  y  $C_6A_2F$ , para relaciones aluminio-hierro de 0 a 2, aunque la mayoría de los autores con---

cuerda en que la composición más probable de esta fase es  $C_4AF$ .

En la figura 1 se muestra una sección pulida y atacada -- con agua del clinker de cemento tipo portland. En esta micro--grafía se observan cristales grandes y angulares de  $C_3S$  con -- algunas inclusiones esféricas, los cristales que aparecen de -- color oscuro son de  $C_3A$ , ligeramente a la izquierda del cen--tro de la micrografía se observan dos cristales, pequeños, de -- periclesa ( $MgO$ ), el material brillante en los intersticios co--rresponde al  $C_4AF$ .

#### 2.2.1.2.- Tipos de cemento portland

De lo anterior, se puede deducir que si se varían las proporciones de materias primas, calizas y arcillas, es posible -- producir cementos tipo portland con diferente composición quí--mica y características de resistencia al medio ambiente. En la -- tabla 1, tomada de la ref. 56 se muestra la composición por -- compuestos de los cinco tipos de cemento reconocidos por el -- ASTM. Los números representan el promedio del por ciento de ca--da compuesto en los cementos comerciales comunes.

De esta tabla se concluye que los compuestos silico-calca--reos ocupan entre 70 y 80 por ciento del total de cemento. De--manera general se conoce que un ligero incremento en el proporcionamiento de calcio en las materias primas, aumenta en forma

considerable el contenido de  $C_3S$  y disminuye el de  $C_2S$ , igualmente una cantidad mayor de hierro disminuye el por ciento  $C_3A$  y aumenta el de  $C_4AF$ . Sin embargo, existe una serie de factores relacionados con la disponibilidad de materias primas, proceso de manufactura y consideraciones de tipo económico que --norman o imponen ciertos límites a la composición del cemento.

### 2.3.- Hidratación del cemento tipo portland

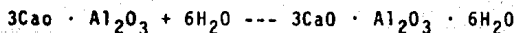
En el momento en que el agua se pone en contacto con los granos de cemento, se inicia una serie de reacciones químicas en la superficie de las partículas, esto permite que iones de todas las fases activas entren en solución. Al fenómeno que se desarrolla a partir de este inicio, se le conoce como "proceso de hidratación". El sulfato de calcio ( yeso ) presente en la formulación del cemento controla la velocidad de las reacciones tempranas, la rapidez con que prosigue la hidratación de los cuatro compuestos principales depende de la temperatura y humedad ambiente y está en función del tiempo.

El estudio del proceso de hidratación del cemento tipo portland se dificulta, no sólo porque los diferentes compuestos se hidratan simultáneamente sino porque los "productos de hidratación" interactúan unos con otros, estos productos son cristalinos, como el hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$ , y microcristalinos como los hidro-silicatos de calcio, también conocidos-

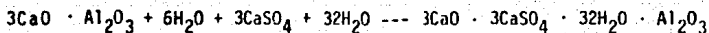


como gel de cemento. Se debe tener presente, que las reacciones descritas a continuación, representan el comportamiento promedio y que existen otras posibilidades y compuestos, desconocidos u omitidos. También que los estudios del proceso de hidratación de los cuatro compuestos principales del cemento,  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , se han hecho por separado, es decir, sobre compuestos puros y preparados en el laboratorio.

El  $C_3A$  reacciona violentamente con el agua y después de pasar por varias composiciones intermedias, alcanza un estado cristalino estable en el sistema cúbico, al que se han integrado seis moléculas de agua. La reacción se describe de la manera siguiente:



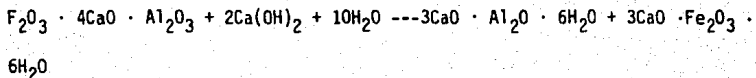
La reacción es tan rápida, que sin la presencia de yeso ocurriría un fraguado instantáneo, rigidizando de manera inmediata a la pasta de cemento en el momento de añadir el agua. El sulfato de calcio,  $CaSO_4$ , ( yeso ) reacciona con el  $C_3A$  para formar sulfoaluminato de calcio, compuesto conocido como "etringita", la reacción se describe como:



Aunque el sulfoaluminato de calcio es un producto de hi-

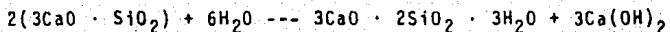
dratación insoluble y cristaliza, no produce fraguado instantáneo. Generalmente el cemento contiene entre tres y cuatro por ciento de yeso, el cual se consume en las primeras 24 horas -- después del mezclado, de ahí en adelante las reacciones prosiguen normalmente.

El  $\text{CaSO}_4$  también reacciona con el  $\text{C}_4\text{AF}$  para formar sulfoferrito de calcio y sulfoaluminato de calcio. Existe una serie de dudas sobre la forma en que se hidrata el  $\text{C}_4\text{AF}$ , sin embargo se estima que el  $\text{Ca(OH)}_2$  juega un papel tan importante como el del agua y se piensa que la reacción tiene la forma siguiente:

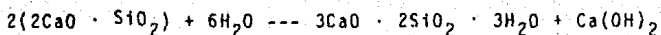


Una vez que las reacciones tempranas se han efectuado, la mayor parte del material hidratado está compuesto por los disilicatos de calcio, que además son responsables de muchas de las características poco usuales que presenta la pasta endurecida de cemento. Ambos tienen el mismo producto de hidratación final, que es el disilicato tricálcico hidratado, las reacciones de estos dos compuestos se escriben de la manera siguiente:

Para el  $\text{C}_3\text{S}$ :



Y para el  $C_2S$ :



Es común que al hidrosilicato de calcio se le nombre "tobermorita" por su constitución semejante a este mineral natural. La diferencia principal en cuanto a la reacción de hidratación de los silicatos reside en la cantidad de calcio que liberan y en la velocidad con que reacciona, el  $C_3S$  libera tres veces más  $(OH)_2$  que el  $C_2S$  y por lo mismo se hidrata más rápido. En la tabla 2, se muestran las velocidades de reacción para cada uno de los cuatro compuestos del cemento tipo portland al 80 por ciento de hidratación y en la figura 2, se muestra, también la velocidad de reacción por compuesto pero en función de la resistencia mecánica y del tiempo, la tabla y la figura se tomaron de las refs. 56 y 40 respectivamente.

En resumen se puede decir que el proceso de hidratación es una reacción química continua, que enfrenta al ingeniero con tres materiales diferentes: concreto fresco, que es trabajable, se puede colocar y compactar para que adquiera la geometría deseada. Concreto fraguado, que es suave, fácil de agrietar, pero capaz de conservar la geometría dada y concreto endurecido que tiene la resistencia mecánica suficiente para su aplicación como material estructural.

## 2.4.- Aditivos superfluidificantes

### 2.4.1.- Definición, clasificación y uso de los aditivos superfluidificantes.

Entre 1978 y 79, Canadá, Estados Unidos y México fueron países sede de tres simposios internacionales, donde se discutieron las ventajas y desventajas que presenta el uso de aditivos superfluidificantes, este hecho revela claramente su importancia y el interés que tienen las personas dedicadas a la tecnología del concreto en conocer las características y modo en que actúan estos productos sobre las propiedades de las mezclas de concreto de cemento tipo portland.

En general, los aditivos superfluidificantes son productos químicos elaborados a partir de sulfonatos orgánicos del tipo  $RSO_3$ , donde R es un grupo orgánico complejo, es decir, son polímeros de alto peso molecular solubles en agua. La solubilidad del compuesto depende del contenido de sulfonatos presentes en su formulación.

A nivel mundial existen entre 10 y 15 marcas comerciales diferentes de estos aditivos, que pueden agruparse en tres tipos de la manera siguiente:

a) Tipo A, formaldehido-naftaleno sulfonatado

- b) Tipo B, formaldehído-melamina sulfonatada
- c) Tipo C, lignosulfonatos modificados

En México es posible obtener cualquiera de los tres tipos generalmente como disoluciones acuosas con un 20 a 42 por ciento de sólidos según la marca, clase y procedencia, aunque también se pueden adquirir como polvos. Los aditivos a base de --naftaleno son de origen Japonés, los de melamina se desarrollaron en Alemania y el más conocido de los lignosulfonatos modificados es Canadiense. En la actualidad diversas compañías producen versiones modificadas de cada uno de los superfluidificantes mencionados.

Una de las mejores descripciones de la forma en que actúan los reductores de agua de alto rango, la proporciona un informe de la asociación inglesa del cemento y el concreto, --ref 4: "Se estima que estos compuestos se adsorben sobre la superficie de los granos de cemento produciendo repulsión entre las partículas como resultado de la naturaleza aniónica del --aditivo que las carga negativamente". En principio la adsorción y efecto dispersante es similar al que se observa en los reductores de agua aniónicos comunes, como lo demuestran los estudios de Daiman y Roy, ref 10 sobre el efecto reductor de agua de los sulfonatos de melamina y naftaleno, el cual se atribuye a un cambio importante en el potencial zeta y que es función de la cantidad de aditivo adsorbido en las superficies del cemento.

#### 2.4.2.- Uso de los aditivos superfluidificantes

Dentro de la tecnología del concreto existen tres formas en las que los aditivos superfluidificantes pueden emplearse:

- a) Para producir concreto con una relación agua-cemento - muy baja.

Cuando se requieren concretos de alta resistencia, se reduce el contenido de agua en la mezcla, esto produce una pérdida de trabajabilidad que puede compensarse añadiendo un por ciento de superfluidificante. Con este método es posible obtener reducciones de agua de mezclado del orden de 30 por ciento y lograr relaciones agua-cemento tan bajas como 0.28 sin detrimento de la compactación durante las operaciones de colado.

- b) Para producir concretos con bajo contenido de cemento.

Debido al interés que existe actualmente en la conservación de energéticos, el uso de aditivos reductores de agua se ha incrementado ya que a través de ellos es posible reducir el contenido de cemento en las mezclas de concreto sin modificar la relación agua-cemento, los superfluidificantes con su mayor capacidad reductora de agua encuentran gran aceptación dentro de este contexto.

c) Para producir concretos muy fluidos

En muchas obras de ingeniería moderna la esbeltez y con--  
gestionamiento del acero de refuerzo en los elementos estructu--  
rales dificulta seriamente la colocación del concreto y su ade--  
cuada compactación, con el uso de superfluidificantes se produ--  
cen concretos autocompactantes y autonivelantes, en este tipo--  
de aplicación el objetivo es aumentar la fluidez sin modificar  
los contenidos de agua o cemento ni producir segregación y/o -  
sangrado. Es interesante hacer notar que el uso de estos aditi--  
vos como reductores de agua no exige cambios importantes en el  
proporcionamiento de las mezclas de concreto, sin embargo, ---  
cuando se trata de producir concretos líquidos se debe incre--  
mentar el contenido de finos entre un 4 y 5 por ciento con el--  
objeto de mantener la cohesión y evitar el sangrado, esto se -  
puede lograr incorporando puzolanas hasta obtener el proporcio--  
namiento adecuado a través de mezclas de prueba.

La importancia de las mezclas de prueba para llegar a la--  
dosificación correcta, se hace patente en los casos que por ra--  
zones de servicio y exposición de las estructuras se necesita--  
usar inclusores de aire, pues se ha observado, refs 27 y 35, -  
que los superfluidificantes a base de naftaleno y de melamina--  
producen pérdidas en la cantidad de aire incluido, mientras --  
que los hechos a base de lignosulfonatos tienden a incrementar  
el contenido de aire, aspecto que debe tomarse en cuenta al se

leccionar los materiales para una aplicación específica, ya -- que entre ellos pueden ser o no compatibles.

2.5.- Efecto de los superfluidificantes en las propiedades del concreto en estado plástico.

2.5.1.- Segregación y sangrado

El fenómeno de segregación se puede definir como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de concreto, de tal forma que su distribución dentro de la matriz de pasta de cemento deja de ser uniforme. La causa se atribuye generalmente a las diferencias de tamaño y peso específico de -- las partículas componentes de dicha mezcla.

Existen dos formas de segregación, una en la que las partículas de agregado grueso ruedan a lo largo de una pendiente y otra en la que las partículas se asientan a velocidades reguladadas por su tamaño y peso. El primer caso se observa en mezclas muy secas, la manera de corregir el defecto es agregar -- más agua, el segundo caso sucede en mezclas con exceso de agua que ocasiona la separación de la lechada y agregados.

Cuando se emplean aditivos superfluidificantes para producir concretos fluidos, aplicación c 2.1.1, se puede producir -- segregación debido a que el aditivo disminuye la viscosidad de



la pasta en forma considerable y por lo mismo la cohesión, sin embargo, se ha observado que, cuando estos compuestos químicos se emplean de acuerdo a lo recomendado por los fabricantes, prácticamente no se ha observado segregación severa, ref. 10.

El sangrado, que es otra forma de segregación, es un fenómeno cuya causa radica en la imposibilidad de los constituyentes sólidos para retener el agua de mezclado. Se manifiesta -- por la migración del agua hacia la superficie del concreto recién colocado, donde se acumula junto a los finos y el hidróxido de calcio que arrastra. Este fenómeno puede ser benéfico si la velocidad de evaporación del agua de sangrado es mayor que su afloramiento pues se mejora a la relación agua-cemento.

Sin embargo, el efecto es casi siempre deletéreo, pues la acumulación de agua, sólidos e hidróxido de calcio produce superficies débiles que deben removerse antes de colocar una segunda capa de concreto, además de que se forma una serie de -- conductos interconectados que disminuye la durabilidad del material al facilitar el ingreso de agentes nocivos del medio ambiente.

En el caso de los concretos fluidos por efecto de los aditivos superfluidificantes se puede presentar sangrado, la severidad de éste dependerá del contenido de aditivo en la mezcla. Cuando se usan de acuerdo a lo especificado por los fabrican--

tes el fenómeno prácticamente no se presenta, ref 51, el defecto puede corregirse incrementando el contenido de finos o añadiendo puzolanas.

Finalmente, se considera importante mencionar que el sangrado también depende de factores físicos y químicos relacionados con la calidad y tipo de cemento, como la finura, la que al incrementarse disminuye el volumen de agua que aflora en la superficie del concreto recién colocado. El mismo efecto produce el por ciento de alquis y de aluminato tricálcico cuando su contenido es alto en la formulación del cemento. La presencia de aditivos superfluidificantes en la mezcla puede cambiar estas condiciones en función de la cantidad de sulfonato que contenga en su estructura, refs 7, 35 y 51, los de melamina influyen menos que los de naftaleno y éstos menos que los de lignosulfonatos modificados.

#### 2.5.2.- Tiempo de fraguado

El término "fraguado" se emplea para describir el cambio de estado plástico a rígido de la pasta de cemento tipo portland. Se estima que el fraguado se debe a la hidratación selectiva de los compuestos del cemento, refs 40 y 56, principalmente del aluminato tricálcico y del silicato tricálcico, de estos, el primero por su inestabilidad reacciona violentamente con el agua pero la presencia de yeso retarda la formación del

hidrato de aluminato de calcio por lo que el segundo fragua -- primero. También se ha sugerido que el fraguado se debe tanto a la velocidad con que se forman productos cristalinos y al desarrollo de películas alrededor de los granos de cemento como a la coagulación y precipitación de productos de hidratación, refs 9 y 40.

En la práctica se utilizan dos términos que definen, de manera arbitraria, los cambios de estado de la pasta durante el proceso de fraguado: uno, fraguado inicial, acompañado de un incremento rápido de temperatura y otro, fraguado final, en el que la temperatura de reacción alcanza un máximo. Para diferenciarlos claramente se han desarrollado métodos que determinan parámetros como la conductividad eléctrica, resistencia a la penetración y, como se mencionó, temperatura, todos en función del tiempo.

En las pastas sin aditivo, prácticamente, sin importar el tipo de cemento los tiempos de fraguado son similares y sólo se modifican por variaciones en la temperatura y humedad ambiente. Cuando se añade un superfluidificante cobra importancia el contenido de aluminato tricálcico, yeso, alcalis, la relación agua-cemento y el tipo de aditivo, según el por ciento de sulfonato de sodio presente en la formulación del producto.

La opinión de varios investigadores refs 26, 29 y 45 so--

bre la influencia que los aditivos superfluidificantes tienen sobre el tiempo de fraguado es contradictoria pues unos dicen que no se presentan modificaciones importantes y otros que sus pruebas demuestran que el fraguado inicial se retarda con cualquiera de los tres tipos de aditivo y que los de naftaleno y lignosulfonato también modifican el fraguado final, sin embargo, concuerdan en que los concretos con baja relación agua-cemento y aditivo a base de melaminas tienen menor tiempo de fraguado.

### 2.5.3.- Contenido de aire

En las mezclas de concreto normalmente se incluye, por efecto de mezclado, un por ciento de aire que depende de la forma y tamaño del agregado y que puede minimizarse con una compactación adecuada. Se caracteriza por el tamaño irregular de las burbujas, generalmente grandes y por la distancia que las separa, también irregular.

En ocasiones, debido a las condiciones de exposición y servicio del concreto, en particular cuando es posible que se congele, se requiere que el contenido de aire en las mezclas sea mayor que el normal, en este caso se incluye aire deliberadamente por medio de aditivos capaces de producir burbujas pequeñas, con diámetros aproximados a 0.1 mm., repartidas de manera uniforme en la pasta de cemento y separadas entre sí una

distancia del orden de 0.25 mm. En las figuras 3 y 4 tomadas de la ref 40 se muestran los resultados experimentales de estudios realizados para determinar el por ciento de aditivo incluyente de aire y la distancia máxima requerida para proteger, de manera eficiente, al concreto de los efectos destructivos que produce la congelación.

De entre los factores que modifican el contenido de aire se puede mencionar la granulometría, y el tipo y forma de los agregados pétreos. Es conocido que los componentes sólidos del concreto alteran el por ciento de aire como resultado de la competencia por el agua con las burbujas que requieren para formar una película de ésta y los agregados; ya que tienen mayor superficie que debe humedecerse, y así disminuyen el agua disponible para envolver burbujas. Otros aspectos determinantes en el contenido de aire son las temperaturas altas y los tiempos de vibrado prolongados que tienden a reducirlo.

Se ha observado, ref 35, que los aditivos superfluidificantes afectan en forma adversa el contenido de aire. Los producidos a partir de melaminas o naftaleno lo reducen y los delignosulfonatos lo incrementan, así como el que su efecto se suma al de los factores mencionados en el párrafo anterior. Por esto se reconoce la necesidad y recomienda preparar mezclas de prueba para establecer la dosificación de aditivo adecuada y medir el contenido de aire al final del mezclado y an-

tes de iniciar la colocación del concreto. ref. 27

## 2.6.- Trabajabilidad del concreto superfluidificado

Entre los muchos términos que se emplean para describir las propiedades del concreto, uno de los más difíciles de definir es el de "trabajabilidad", debido principalmente al mal uso que se hace de la palabra y al olvido de que ésta se refiere a una característica por sí misma y no a una serie de condiciones que debe reunir una mezcla de concreto para que se considere aceptable.

Se conoce que el grado de compactación afecta de manera importante la resistencia mecánica que puede alcanzar un concreto, es pues, muy importante que la consistencia de la mezcla sea tal que permita su transporte, colocación y acabado sin que se produzca segregación, un concreto que cumple con estas condiciones se dice que es "trabajable". Sin embargo, definir así a la trabajabilidad no es adecuado, porque depende de los medios de compactación y del tipo de obra, que no son los mismos para concreto masivo que para colar elementos estructurales esbeltos en cimbras de geometría complicada y congestionadas con acero de refuerzo.

La definición del concepto de trabajabilidad exige recordar que cuando se compacta un concreto, ya sea por vibrado o

varillado, se realiza un "trabajo" para vencer la fricción entre partículas y la que se genera entre el material y la superficie del molde y del refuerzo, con el objeto de expulsar la mayor cantidad de aire atrapado que sea posible para alcanzar una configuración granular cerrada. Adicionalmente se debe considerar que parte del trabajo se emplea en vibrar al molde, acero de refuerzo y partículas ya consolidadas, por lo que habrá un trabajo desperdiciado y otro útil, este último se emplea para vencer las fricciones de superficie e internas.

Sólo la fricción interna, es decir, la que existe entre partículas, es una propiedad intrínseca de una mezcla de concreto, característica que permite definir a la trabajabilidad como "la cantidad de trabajo interno necesaria para lograr que una mezcla de concreto adquiera una configuración granular cerrada".

A manera de comentario final, se puede mencionar que la mayoría de los investigadores consideran que el contenido de agua es el factor más importante y determinante del grado de trabajabilidad de la mezcla, aunque se acepta la existencia de varios factores relacionados entre sí cuya influencia en la trabajabilidad también es importante.

### 2.6.1.- Medida de la trabajabilidad

Aparentemente no existe una prueba de laboratorio y/o de campo, que permita medir en forma directa la trabajabilidad de una mezcla de concreto, según la definición de trabajabilidad. Por esto se han desarrollado varios procedimientos con los que se intenta relacionar a la trabajabilidad con alguna medida física fácilmente determinable y aunque ninguno de los métodos es totalmente satisfactorio si proporciona información útil -- dentro de un cierto intervalo de variación de esta característica.

Las pruebas que se utilizan para estimar que tan trabajable puede ser un concreto son: la prueba de fluidez, la de remoldeo, vebe, penetración con la bola kelly, factor de compactación y la de revenimiento. De éstas sólo se describirá la última por ser de relevancia para la tesis y de uso rutinario en las obras.

La prueba de revenimiento, según la norma mexicana NOM-C-156-1980, consiste en llenar un molde con forma de cono truncado y de altura igual a 30 cm. con concreto fresco, en tres capas de igual volumen, cada capa se compacta varillándola 25 veces con una barra de acero lisa de 16 mm. de diámetro. El molde cónico debe colocarse sobre una superficie lisa y no absorbente donde se sostiene firmemente mientras se llena, al termi



nar se enraza la superficie de concreto y retira el molde en forma lenta y continua en dirección vertical.

El concreto sin confinar tratará de adoptar una geometría estable, que dependerá de la cohesión de la mezcla, reduciendo su altura con respecto a la del molde, a la medida entre las dos alturas se le llama revenimiento. Así, una mezcla "seca" - que conserva la geometría y dimensiones del molde se dice que tiene revenimiento cero.

#### 2.6.2.- Influencia de los superfluidificantes sobre el revenimiento.

De los efectos que producen los aditivos superfluidificantes sobre las propiedades del concreto, el más notable y responsable del desarrollo de este tipo de productos químicos, es la forma espectacular en que modifican la trabajabilidad. Por esta razón, la mayor parte de los autores han dedicado muchas horas de investigación a determinar, en función de esta característica del concreto en estado plástico y de manera comparativa, la eficiencia de los distintos superfluidificantes. Uno de los trabajos más completos con relación a esto último, es el reportado por R.K. Dhir y A.W.F. Yap, ref 51, tanto por el número de variables y observaciones como por la presentación y manejo de los resultados experimentales.

La mayoría de los autores explica el efecto fluidificante como un cambio de carga eléctrica en las partículas de cemento, debido a la adsorción superficial y carácter aniónico del aditivo, que produce repulsión entre ellas y las dispersa, lo que aumenta la uniformidad y fluidez de la mezcla. Así mismo, consideran que el tipo de cemento y superfluidificante como la dosis, finura, relación agua-cemento, temperatura y humedad ambiente determinan el comportamiento del concreto en estado --- plástico.

Los mismos investigadores, también concluyen que lo notable del efecto fluidificante y reductor de agua se opaca por la velocidad con que las mezclas pierden su fluidez. Para remediar esta situación, Hattori, refs. 14 a 16, realizó una serie de pruebas con el objeto de conocer la razón de la pérdida de revenimiento y establecer un procedimiento que minimizará esta desventaja, la cual previene el uso de los aditivos superfluidificantes en la industria del concreto premezclado.

Las pruebas de Hattori consistieron en medir las variaciones del potencial zeta de las pastas de cemento en función del tiempo, por ciento de aditivo y relación agua-cemento y en relacionar estas variaciones con propiedades reológicas como la fluidez y viscosidad de las pastas. La conclusión de su trabajo es que: "la coagulación de las partículas hidratadas de cemento, durante el período de latencia de las pastas, juega un-

papel más importante que los enlaces químicos que pudieran formarse entre partículas como resultado del proceso de hidratación". Sostiene su conclusión en la concordancia que existe entre sus resultados y las expresiones matemáticas parcialmente basadas en la teoría de Smoluchowski.

Varios investigadores demostraron que al añadir una segunda y tercera dosis de aditivo, permitía conservar la fluidez del concreto por varias horas, sin embargo, se observó que al dosificar cantidades iguales a la inicial se incrementaba la viscosidad de la pasta, por lo que en algunos estudios, así como en las normas DIN, no se recomienda agregar una tercera dosis.

Los estudios de Hattori sobre redosificación revelan que si el aditivo se añade al final de lapsos fijos y en cantidades aproximadas al 20 por ciento de la primera dosis, el revenimiento se mantiene sin detrimento de la viscosidad y calidad del concreto. En las figs. 5 a 9, se muestra en forma gráfica el resultado de redosificar el aditivo tomando en cuenta la temperatura ambiente.

2.7.- Influencia de los aditivos superfluidificantes sobre las propiedades del concreto endurecido.

La mayor parte de la información disponible sobre los ---

efectos de estos aditivos en las propiedades del concreto endurecido proviene de Estados Unidos y Canadá, en primer término y en segundo, de Japón e Inglaterra. Debido a las condiciones severas de servicio y exposición, desde el punto de vista climático, los estudios se orientan, principalmente, a determinar el comportamiento del concreto superfluidificado bajo condiciones de congelación y deshielo, así como del ataque químico, en especial, por sulfatos.

#### 2.7.1.- Propiedades mecánicas

De todas las características del concreto de cemento tipo portland, la más conocida y normativa de su calidad como material de construcción es su resistencia a la compresión, tanto por la facilidad con que se determina e interpreta como por su íntima relación con las demás propiedades.

En páginas anteriores, se mencionó que el uso de aditivos superfluidificantes permite reducir el agua de mezclado hasta un 30 por ciento sin detrimento de la trabajabilidad, esta reducción, disminuye sustancialmente la relación agua-cemento -- con lo que las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad se incrementan, tabla 3, como consecuencia lógica. Sin embargo, existe evidencia de que cuando estos aditivos se utilizan como fluidificantes, no como reductores de agua, las propiedades mecánicas también se mejoran.

Los resultados experimentales de Hewlett y R. Nixon, ref-38 muestran incrementos, del orden de 15 por ciento, en la resistencia a compresión de concretos superfluidificados a edad temprana y similares a las de mezclas testigo a largo plazo. - J.J. Brooks y P.J. Wainwright ref 3 reportan incrementos del - 19 por ciento respecto a los concretos sin aditivo para relaciones agua-cemento, contenido de cemento y consistencias iguales, algunos autores como Neville ref 40 y Malhotra ref 28, reportan resistencias mayores que los testigos hasta edades de un año tanto en especímenes compactados por vibrado como en los no compactados. En la tabla 4, se muestran los resultados experimentales de Seabrook y Malhotra ref 53, de los que se podría deducir que los aditivos influyen en el proceso de hidratación del cemento tipo portland.

Otros autores, como R.K. Dhir y A.W.F. Yap ref 51, aseguran que las propiedades mecánicas a corto y largo plazo no se modifican por la presencia de los superfluidificantes, para relaciones agua-cemento iguales, por lo que P.K. Mehta ref 38 -- realizó una serie de pruebas con el objeto de terminar con la controversia.

Sus ensayos, sobre una pasta de cemento con relación agua-cemento igual 0.28 demuestran que la porosidad global se reduce cuando se usan estos aditivos y como la resistencia está en función de la porosidad, concluye que si hay influencia sobre

la hidratación del cemento y por lo tanto la resistencia a compresión se debe incrementar.

### 2.7.2.- Contracción por secado y flujo plástico del concreto superfluidificado.

La información que existe sobre la contracción por secado del concreto superfluidificado es muy limitada. Los datos experimentales indican que la contracción es similar a la del concreto sin aditivos aunque algunos autores, ref 26, reportan -- que es menor y por debajo del máximo especificado en la norma-estándar ASTM C-494.

Autores como Ghosh y Malhotra, Jonhston et al. y Brook et al, ref 12, 23 y 3, reportan que en general el flujo plástico del concreto superfluidificado es similar al del concreto sin aditivo, sin embargo, debe notarse que entre estos autores --- existen diferencias importantes en relación con las condiciones experimentales, como tipo de concreto, carga, humedad y -- temperatura ambiente, que hacen difícil establecer puntos de -- comparación. En la tabla 5, se presentan algunos datos sobre -- el flujo plástico tomados de la ref 12.

### 2.7.3.- Durabilidad del concreto superfluidificado

#### 2.7.3.1.- Resistencia al ataque por sulfatos

Del número relativamente grande de autores consultados, -

sólo se encontraron tres que reportan en sus artículos algunos resultados experimentales de la respuesta del concreto superfluidificado al ataque por sulfatos. Las pruebas consistieron básicamente, en exponer una serie de especímenes prismáticos - de concreto con y sin aditivo a base de naftaleno, a la acción de una disolución acuosa al 3 por ciento de sulfato de magnesio durante 300 días. La durabilidad se estimó de manera comparativa y en función de la variación de peso, longitud y módulo de elasticidad dinámico, registrados a intervalos de 10 días.- Brooks et al, Collepardi et al, y R.K. Dhir, refs 3, 8 y 51, - concluyen que no existe diferencia en la respuesta al ataque - por sulfatos entre concretos con y sin aditivo superfluidificante.

#### 2.7.3.2.- Resistencia a ciclos de congelación y deshielo.

La exposición del concreto de cemento tipo portland, endurecido y saturado, a ciclos de congelación y deshielo, constituye una de las pruebas más severas a que puede someterse el material para determinar su durabilidad. Cuando el agua contenida en el sistema capilar de la pasta de cemento se congela, genera expansión, esfuerzos de tensión y micro-agrietamiento - en el concreto, efectos que se acumulan conforme el número de ciclos aumenta.

La congelación del concreto es un proceso regulado por la

velocidad de transferencia de calor, el incremento progresivo en la concentración de alka<sup>l</sup>is disueltos en la fase líquida -- aún sin congelar y por diferencias de puntos de congelación relacionados con las dimensiones de los capilares. La formación de hielo se inicia en las cavidades grandes y se extiende gradualmente a las más pequeñas, lo que ocasiona incrementos de presión conforme disminuye el tamaño del capilar. Los poros de gel de cemento son tan reducidos que impiden la formación de hielo a temperaturas superiores a  $-78^{\circ}\text{C}$  prácticamente el agua dentro de ellos no se congela.

Con la caída de temperatura, debido a la diferencia de entropía entre el hielo y el agua del gel, ésta adquiere un potencial energético que le permite moverse hacia los capilares que contienen hielo, ahí su energía disminuye y su temperatura se incrementa hasta el punto de congelación, la masa de hielo, contenida en los capilares grandes, aumenta de volumen y por consecuencia se genera una expansión adicional, cuya fuerza, normalmente, supera la resistencia a tensión del concreto.

Se conoce, que para lograr un comportamiento satisfactorio, desde el punto de vista durabilidad del concreto, en un ambiente donde se presentan ciclos de congelación y deshielo, la pasta de cemento debe protegerse mediante la inclusión de aire en forma de burbujas diminutas distribuidas y espaciadas de manera uniforme y que esto es posible si la mezcla de concreto



contiene, en la proporción correcta, un aditivo inclusor de aire. El aire incluido proporciona espacio adicional para la formación de hielo y disipa la energía y presiones osmóticas del agua superfría que producen la desintegración del concreto.

Para obtener la protección adecuada se requiere que el -- factor de espaciamiento, que es un índice relacionado con la -- distancia máxima entre cualquier punto de la pasta de cemento y la periferia de una burbuja, no exceda de 200 micras, según las especificaciones ASTM. Existen varias publicaciones de laboratorios de investigación en Estados Unidos, cuyos resultados experimentales indican que el concreto superfluidificado -- no cumple con estas especificaciones, pero que a pesar del mayor espaciamiento la resistencia a congelación y deshielo, determinada de acuerdo a la norma ASTM C-666, no se afecta, refs 12, 23, 26, 27, 38 y 45. En las tablas 6 y 7 se muestran los -- resultados experimentales reportados en las refs 27 y 39.

Sin embargo, se aprecia en la literatura, la falta de concordancia en opiniones sobre el efecto de los aditivos superfluidificantes en la resistencia a la congelación y deshielo. Dos artículos canadienses, refs 12 y 26, dicen que el uso de -- productos a base de melamina sulfonada disminuyen el contenido de aire, además de incrementar el factor de espaciamiento y que en sus pruebas de laboratorio, el concreto superfluidificado -- mostró pérdidas de resistencia a la congelación próximas al

40 por ciento en relación a los concretos sin aditivo.

Otros artículos, provenientes de Estados Unidos también - hacen comentarios sobre pérdidas de resistencia al ataque por congelación, en concretos fabricados con cemento tipos I y V, agregados basálticos y superfluidificante a base de melaminas. En general, los investigadores están de acuerdo en que los productos a base de lignosulfonatos modificados incrementan el -- por ciento de aire incluido y que su acción es deletérea porque no se cumple con el factor de espaciamiento especificado - ni con el tamaño de burbuja, así como en la necesidad de hacer pruebas de mezclado y compatibilidad de aditivos para lograr - la dosificación y tipo de concreto adecuado a las características particulares de la obra.

#### 2.8.- Efecto de los aditivos superfluidificantes en el proceso de hidratación de las pastas de cemento tipo portland.

Aparentemente, la influencia de los superfluidificantes - sobre el proceso de hidratación de las pastas de cemento tipo portland se ha estudiado poco, a juzgar por lo escaso de literatura al respecto. La mayor parte de los investigadores reportan los resultados de programas experimentales realizados para determinar el efecto de estos aditivos en la reacción de algunos compuestos del cemento, preparados con alto grado de pureza y en condiciones de laboratorio.

De entre los minerales que componen el clinker de cemento los más activos, desde el punto de vista hidratación, son el  $C_3A$  y el  $C_3S$ , la rapidez con que reaccionan en presencia de agua puede controlarse si durante la pulverización del clinker se agrega un por ciento de  $CaSO_4 + 2H_2O$ . Cuando se usan aditivos sulfonados se espera un efecto retardante en el fraguado y velocidad de hidratación de las pastas de cemento por reacción con el  $SO_3$  del superfluidificante.

Los experimentos de S. Slenicka, E. Zielinska et al y Colleparodi et al, refs. 42, 57 y 6, confirman que el  $C_3A$  y el sistema  $C_3A + CaSO_4 + 2H_2O$ , presentan un retardo espectacular en su hidratación como consecuencia de agregar melaminas sulfonadas a la pasta y que el efecto aumenta con la dosis, ref. 42, la cual alcanzó un máximo de 4 por ciento. Las conclusiones de estos artículos, sobre la alteración en el proceso de hidratación se basan en análisis comparativos por difracción de rayos-x, calorimetría y morfología entre muestras con y sin aditivo. Los patrones, para establecer diferencias, fueron el por ciento de  $C_3A$  sin hidratar y la cantidad de etringita producida, relacionados con la edad de las pastas.

En el caso del  $C_3S$ , se observó que el aditivo a base de melaminas produce un efecto aparente de retraso en la velocidad de reacción de este compuesto, pero que después de un lapso, relativamente corto, se produce una aceleración moderada

en su proceso de hidratación, ref 6. Las determinaciones se hicieron de manera similar a las que emplearon para el  $C_3A$ , pero el parámetro de comparación fue la velocidad de formación de  $Ca(OH)_2$  en función del tiempo.

Los reportes de algunos investigadores, sobre la tendencia de los aditivos a base de melamina y de naftaleno, a incrementar la resistencia mecánica del concreto, cuando se usan como fluidificantes, es decir, sin modificar la relación agua-cemento, motivaron que A. Mor y P.K. Mehta, ref 38, realizaron una serie de pruebas con estos dos aditivos con el objeto de establecer si efectivamente mejoraban las propiedades mecánicas de la pasta de cemento. Este estudio es uno de los pocos que intenta establecer relaciones entre el efecto de los aditivos y modificaciones en el proceso de hidratación relacionadas con la micro-estructura y resistencia mecánica y por lo mismo se considera de relevancia para los fines de esta tesis.

A. Mor y P.K. Mehta hicieron algunas pruebas preliminares con mezclas de concreto normal, fluidificado con aditivos tipo A, naftaleno y tipo B, melamina. Mantuvieron constante la relación agua-cemento y variaron el por ciento de aditivos entre uno y tres. Todos los especímenes permanecieron en una cámara de curado a  $23 \pm 1^\circ C$  y 100 por ciento de humedad relativa hasta la fecha de ensaye. Determinaron la resistencia por compresión a 7, 28 y 210 días de edad. Sus resultados muestran incre

mentos de resistencia cercanos a 12 por ciento para 7 días y de 5 por ciento a 210 días comparados con la del concreto de referencia.

Para conocer la razón de estas diferencias prepararon pastas de cemento con relación agua-cemento igual a 0.28, con y sin aditivo, curados en forma estándar por 28 días, al final de los cuales detuvieron la hidratación por lavado con acetona y secado a 70°C durante 24 horas. Las determinaciones consistieron en medir las pérdidas por ignición, para establecer el por ciento de agua de cristalización y porometría. Los resultados de esta parte del estudio se muestran en la tabla 10 y figura 8.

A. Mor y Mehta, ref. 38, sugieren que desde el punto de vista resistencia a la compresión, el volumen de poros capilares debe dividirse en dañinos e inofensivos, los primeros mayores de 1000 Å y los segundos menores de este valor. En la tabla 8, se observa que la pasta de referencia tiene 40 por ciento de poros mayores de 1000 Å, que contrasta con el 23 por ciento que muestran las pastas sin aditivo, por lo que de acuerdo con sus sugerencias se puede aceptar que el cambio en la distribución de tamaño de poro afecta la resistencia mecánica del concreto.

Desde el punto de vista porosidad, parece acertado respon

der que una disminución en el contenido de poros mayores de --  
1000 Å, en la pasta de cemento endurecida, produce un increment  
to en la resistencia mecánica del concreto, así mismo, que el -  
aumento en el por ciento de poros menores de 250 Å, fig. 10, -  
es el producto de una segmentación capilar temprana, debida a -  
una aceleración en el proceso de hidratación causada por la mej  
or dispersión de partículas de cemento cuando se agregan su-  
perfluidificantes a la mezcla.

## 2.9.- Conclusiones del estudio bibliográfico

Es indiscutible que los aditivos superfluidificantes tend  
drán una mayor aceptación en la industria del concreto, espe-  
cialmente, en aplicaciones de prefabricación. Actualmente ---  
existe suficiente información y experiencia acumulada para --  
usar estos aditivos de manera confiable. Sin embargo, los ---  
usuarios deben considerar las particularidades de cada aplicac  
ción y cumplir estrictamente con las normas y procedimientos-  
establecidos e implementar los controles de calidad necesa---  
rios, con objeto de evitar problemas.

El uso de aditivos superfluidificantes en la industria -  
del concreto presenta ventajas, como la posibilidad de redu-  
cir el contenido de cemento y mejorar su eficiencia como mater  
ial aglutinante. Además de aumentar la trabajabilidad de las  
mezclas de concreto y probablemente su resistencia a compre--

sión, estos aditivos reducen en forma considerable el tiempo de vibrado y el necesario para alcanzar la resistencia de des-cimbrado, lo que significa una mayor disponibilidad de cimbras que se traduce en incrementos de productividad.

Algunos investigadores también consideran ventajoso, el que estos aditivos permitan bajas temperaturas de curado y con-cuerdan en que una de las más importantes, es la permeabilidad reducida que se logra en el concreto endurecido, pues minimiza el ingreso de sulfatos y otros agentes nocivos para la estructu-ra del concreto.

Como limitaciones, se puede mencionar el costo elevado -- del aditivo, la rapidez con que se pierde revenimiento, la for-ma en que modifican el por ciento de aire incluido y las carac-terísticas necesarias para optimizar la resistencia del concre-to a la congelación y deshielo. También, como se menciona en - las refs. 3, 27 y 29, dificulta y retrasa los procedimientos - de acabado y, desde el punto de vista estético, decolora lige-ramente los concretos con tintes.

De los estudios de Hattori, ref 24 a 16, es posible con-cluir que la rapidez con que los concretos superfluidificados pierden revenimiento, se pueden eliminar del grupo de limitan-tes redosificando el aditivo, siempre y cuando las dosis adi-cionales no excedan el 20 por ciento de la primera, esto permi

te mantener el tiempo de fraguado dentro de límites aceptables sin incrementar excesivamente los costos. El método de Hattori se puede automatizar de manera sencilla y relativamente económica para que la industria del concreto premezclado disminuya su reticencia a emplear estos aditivos.

La pérdida de revenimiento, según Hattori, ref 14 a 16, se debe a la coagulación de productos de hidratación y a enlaces de tipo físico entre partículas de cemento. Esta conclusión, aunque razonable no se considera totalmente satisfactoria, pues en su artículo describe y corrige un síntoma y no la causa misma, ya que si se presenta floculación de partículas, en una pasta supuestamente dispersa, seguramente se debe a un fenómeno relacionado con reacciones de tipo químico entre el aditivo y los productos de hidratación que revierte el potencial zeta de la suspensión y disminuye la solubilidad del superfluidificante, produciendo el efecto caracterizado por Hattori como coagulación.

Se ha observado que los aditivos superfluidificantes no funcionan con los cementos aluminosos y que su acción sobre el cemento tipo V no es la deseada, asimismo cuando se utiliza cemento tipo III se logra un efecto fluidificante óptimo y a pesar de que varios investigadores reportan estas diferencias relacionadas con el tipo de cemento, ninguno trata de explicarlas.



Aparentemente no existe acuerdo entre diversos investigadores respecto al posible incremento de resistencia mecánica del concreto superfluidificado. Independientemente de si se mejora o no la resistencia a compresión, los autores evitan explicar la causa, con excepción de A. Mor y P.K. Mehta, pero estos investigadores utilizan el efecto de fragmentación capilar temprana para explicar otro efecto y su conclusión de que en una pasta dispersa el sistema capilar se fragmenta rápidamente como consecuencia de la formación acelerada de productos de hidratación no es razón suficiente, ya que para acelerar la reacción de hidratación de los compuestos de cemento se requiere que la fase líquida no se satura con hidróxido de calcio, o que éste se precipite y cristalice de manera rápida para que se acelere la hidratación del silicato tricálcico, con lo que se produciría la fragmentación mencionada en el artículo.

El efecto de los aditivos sobre el proceso de hidratación no se ha estudiado, aunque existen artículos que describen la influencia de los superfluidificantes en la reacción de algunos compuestos del cemento tipo portland, no se puede considerar que el comportamiento de un compuesto, preparado en el laboratorio con alto grado de pureza, sea representativo del que tendría el mismo compuesto, en el cemento, preparado en condiciones industriales.

Se conoce, de estudios morfológicos realizados con méto--

dos de microscopía electrónica y microquímicos por medio de la microsonda electrónica, que cada uno de los compuestos principales del cemento presenta diferente grado de contaminación y que las impurezas juegan un papel muy importante en la velocidad de reacción de estos compuestos con el agua. Además la hidratación del cemento implica la reacción simultánea de todos sus compuestos, lo que produce interferencia debido a la generación de productos de hidratación que compiten por el agua y el espacio.

Finalmente, se considera recomendable ampliar los estudios sobre el efecto de los superfluidificantes en las propiedades del concreto en estado plástico y endurecido, así como la influencia sobre el proceso de hidratación de las pastas del cemento, a fin de explicar las causas de los fenómenos observados y descritos por los autores de los artículos consultados.

### 3.- OBJETIVOS Y DESCRIPCION DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 3.1.- Objetivos

Después de revisar la literatura, que se consideró importante para los fines de este trabajo, fue relativamente sencillo percatarse de la falta de información sobre la influencia de los aditivos superfluidificantes en el proceso de hidratación del cemento tipo portland, así como de la existencia de una serie de fenómenos relacionados con las propiedades reológicas del concreto en estado plástico y características físicas y mecánicas del material en estado endurecido que, a juicio de la autora, requieren estudiarse para hacer más comprensible la manera en que actúan estos aditivos.

En función de lo anterior se propuso, como objetivo principal del estudio experimental, investigar el efecto de los aditivos superfluidificantes sobre el proceso de hidratación de las pastas de cemento tipo portland y su relación con las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado plástico y endurecido. Requiriéndose para este objeto de la planeación y ejecución de un programa de pruebas de laboratorio que permitiera comprobar las siguientes hipótesis de trabajo:

a) Los aditivos superfluidificantes afectan la cinética del proceso de hidratación del cemento tipo portland, porque

reaccionan químicamente con los productos de hidratación y los aluminatos del cemento.

b) La pérdida rápida de fluidez que experimentan las mezclas de concreto fresco y las propiedades físicas y mecánicas que exhibe el concreto endurecido, cuando se incluyen aditivos superfluidificantes, son el reflejo de la reacción entre aditivos, productos de hidratación y compuestos del cemento.

c) Se puede establecer, de manera comparativa, la forma en que los aditivos superfluidificantes alteran la cinética -- del proceso de hidratación de las pastas de cemento mediante -- determinaciones diferenciales de parámetros como el tiempo de fraguado, calor de hidratación, agua de cristalización, contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  libre,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , etringita y por las cantidades de  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  sin hidratar, según la edad de ensaye.

### 3.2.- Descripción del estudio experimental

#### 3.2.1.- Variables

De las hipótesis anteriores se desprende que el tipo y -- contenido de aditivos superfluidificantes son las variables -- normativas de los fenómenos que se pretende estudiar. También, que existe un grupo de variables, independientes de las propiedades del concreto pero relacionadas con el porcentaje de aditi

vo, cuyo número relativamente grande e influencia determinante en los valores de los parámetros propuestos en la hipótesis c, requiere de una selección adecuada para que el número de pruebas de laboratorio se minimice sin detrimento de la información experimental.

Así, se decidió que las variables independientes fueran: el tipo y contenido de aditivos superfluidificantes, la relación agua-cemento y la edad de ensaye. Se mantendría constante el tipo de cemento, la granulometría, tamaño máximo y tipo de agregados, así como la forma de curado. Las variables dependientes serían las propuestas en la hipótesis c.

### 3.2.2.- Materiales

#### 3.2.2.1.- Selección de aditivos superfluidificantes

Una de las condiciones, difícil de satisfacer por su importancia para los objetivos de la investigación fue la selección de aditivos, ya que para determinar su influencia en la cinética del proceso de hidratación del cemento se requería que los superfluidificantes fueran prácticamente puros y en el mercado normalmente se les encuentra asociados con productos acelerantes o retardantes que afectarían las determinaciones que se pretendían realizar, además de que comercialmente se presentan como disoluciones acuosas preparadas con agua potable -

común, que contiene cloruros y que también afectarían los resultados experimentales.

Para obtener los aditivos, con las características adecuadas, fue necesario visitar a varios distribuidores para solicitarles muestras e información sobre la composición química de sus productos. Con las muestras se hicieron algunas pruebas -- preliminares de fluidificación, grado de pureza, densidad, con contenido de sólidos y cloruros, los resultados de estas pruebas permitieron seleccionar dos aditivos superfluidificantes que -- por su eficiencia como reductores de agua de mezclado y composición química se aproximan a los productos con las características deseables.

Uno de los aditivos es un condensado de naftaleno-formaldehido-sulfonato de sodio, clasificado como "tipo A" y el otro producto es un condensado de melamina-formaldehido-sulfonato -- de sodio, "tipo B". Sus propiedades físicas y químicas se reportan en la tabla 10 y sus fórmulas estructurales en las figuras 11 y 12. Cabe mencionar que estos productos se adquirieron tanto en su presentación normal, disoluciones acuosas, como en polvo.

### 3.2.2.2.- Cemento

Para la realización de las pruebas se adquirió un lote de cemento tipo 1, del que se tomaron muestras para conocer su --

composición química y propiedades físicas, las cuales se muestran en la tabla 11. Todas las determinaciones se hicieron de acuerdo a las normas mexicanas NOM-C-1, C-130, C-131 y C-152.

Debido a que uno de los objetivos del estudio es obtener resultados comparables con los reportados en la literatura, el criterio para la selección del cemento se basó en el número de autores que menciona haber usado cemento tipo 1 en sus experimentos.

### 3.2.2.3.- Agregados

De los agregados pétreos disponibles en la ciudad de México se escogieron, por ser los más comunes, gravas y arenas azules provenientes de las minas de Santa Fe. Una vez que los agregados se encontraron en el laboratorio se procedió a tomar muestras, en la forma que indica la norma NOM-C-30, para conocer su granulometría y propiedades físicas, determinadas de acuerdo a lo especificado en las normas NOM-C-164 y C-165. Del análisis granulométrico se observó que los agregados venían contaminados con 13.5 por ciento de polvos y que el tamaño máximo de agregado grueso era de 37 mm. Estos valores quedan fuera de las especificaciones, por lo que para remediar el problema, los agregados se separaron por tamaños y se lavaron con agua a presión para eliminar el mayor contenido posible de finos.

Posteriormente, los agregados separados por tamaños y lavados se remezclaron de acuerdo a granulometrías estándar, con tamaño máximo de agregado grueso igual a 19 mm. y módulo de finura igual a 2.8 para arenas. Se repitieron las pruebas físicas y se procedió a secar todo el agregado en un horno a 110°C por 24 horas, al final de las cuales se retiró el material del horno, se permitió que enfriara y se envasó en bolsas de polietileno hasta el momento de usarlo. El objeto de secar los agregados fue el de controlar el agua de mezclado con mayor precisión. La granulometría y propiedades de los agregados se muestra en las tablas 12 y 13.

### 3.2.3.- Concretos y especímenes de ensaye

#### 3.2.3.1.- Mezclas de concreto

Se diseñaron dos mezclas de concreto, de acuerdo a las recomendaciones del ACI para proporcionar mezclas de concreto normal, con relaciones agua-cemento igual a 0.35 y 0.45, el agua se dosificó para obtener un revenimiento inicial de 51 cm. Debido a la presencia de los aditivos superfluidificantes, fue necesario ajustar el contenido de polvos y proporcionamiento de cada mezcla, a través de mezclas de prueba, con el objeto de evitar problemas de segregación y/o sangrado excesivo. En las tablas 14 y 15 se muestran las dosificaciones finales de los concretos estudiados, donde se observa que el contenido de



finos, necesario para evitar el problema de segregación y sangrado, se incrementa proporcionalmente al por ciento de aditivos.

El mezclado se hizo siempre de la misma manera y en la revolvedora que se muestra en la figura 13. El procedimiento consistió en colocar el agua de mezclado y agregados en la revolvedora, después de un período de absorción igual a 1 minuto, se mezclaron durante 15 segundos, se agregó el cemento y se procedió con dos minutos de mezclado y un período de reposo de 1 minuto, al final de éste se reinició el mezclado por un minuto adicional.

Al final del proceso de mezclado se tomó una muestra del concreto y se midió el revenimiento. Para el caso de mezclas sin aditivo se procedió al colado de especímenes de ensaye y a determinar el contenido de aire, peso volumétrico y pérdidas de revenimiento en función del tiempo, para los concretos con aditivo, se añadió el producto en polvo y remezcló por 2 minutos al final de estos se midió el revenimiento para continuar con el colado y demás pruebas.

3.2.3.2.- Colado de especímenes y pruebas al concreto en estado plástico.

De cada mezcla se fabricaron 9 cilindros de 15 x 30 cm. -

para determinar el módulo de elasticidad y resistencia a compresión, 6 vigas de 10 x 10 x 30 cm. y 6 de 15 x 15 x 70 cm. - para pruebas de congelación y deshielo y resistencia a la tensión por flexión respectivamente, los especímenes se ensayaron a 7, 28 y 90 días de edad.

Después del colado permanecieron en sus moldes por 24 horas cubiertos por una membrana de mylar para evitar la evaporación, transcurrido este lapso se descimbraron, marcaron y guardaron en una cámara de curado en condiciones estándar. 24 horas antes del ensaye los cilindros se cabecearon con azufre y se sumergieron en agua, a  $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$  de temperatura y saturada con cal, junto con las vigas. 1 hora antes de la prueba todos los especímenes se secaron superficialmente y recubrieron con mylar hasta el momento de romperlos, esta última acción garantiza que el ensaye de especímenes se haga en condiciones saturadas y superficialmente secas.

Paralelamente al colado se determinó el peso volumétrico, contenido de aire y tiempo de fraguado de acuerdo a las normas mexicanas NOM-C-162, C-157 y C-177, así mismo, se tomó una muestra de concreto, la que se colocó en una revoladora de 20 litros de capacidad, esta muestra sirvió para conocer las pérdidas de fluidez en función del tiempo. Esto último se logró midiendo el revenimiento a intervalos de 15 minutos, la prueba se suspendió cuando el concreto alcanzó un revenimiento igual-

a 2 cms. En las figuras 14 a 16 se ilustran los procedimientos para medir el peso volumétrico, contenido de aire y tiempo de fraguado y en las figuras 17 y 18 se muestran las pruebas de pérdida de revenimiento.

### 3.2.3.3.- Pruebas al concreto en estado endurecido

A todas las mezclas de concreto se les determinó su resistencia a compresión y módulo de elasticidad de acuerdo a las normas NOM-C-83 y ASTM-469, para esto se empleó una máquina de ensayos universal marca Baldwin con capacidad de 200 tn de carga, este equipo tiene integrado un reloj y un graficador con los que se puede registrar la velocidad de carga y la deformación vs carga, la resistencia por compresión y módulo de elasticidad se midieron a 7, 28 y 90 días de edad. Las figuras 19 y 20 muestran el equipo y procedimiento de ensaye.

El estudio del comportamiento en flexión de los concretos con y sin aditivo también se hizo con este equipo, siguiendo el método de ensaye especificado en la norma mexicana NOM-C-191, el cual se ilustra en la figura 21, las edades de prueba fueron las mismas que para las pruebas por compresión.

La durabilidad del concreto se estableció mediante la prueba de congelación y deshielo según la norma NOM-C-205. Se usó un equipo marca Soil-test automático, capaz de alternar va

rios ciclos de congelación en lapsos relativamente cortos. En las figuras 22 a 24 se muestra el equipo que se empleó para determinar el factor de durabilidad de los concretos estudiados. Debe mencionarse que los registros se hicieron cada 20 ciclos hasta que las lecturas del equipo de ultrasonido disminuyeron un 50 por ciento.

### 3.2.4.- Preparación de pastas de cemento y especímenes de ensaye.

Debido a que las determinaciones para establecer el efecto de los aditivos superfluidificantes sobre el proceso de hidratación de las pastas de cemento requieren un alto grado de precisión y repetibilidad, fue necesario realizar una serie de pruebas preliminares de mezclado y preparación de muestras para ensaye, así como familiarizarse con el manejo de los distintos equipos que se emplearon. Adicionalmente se hizo un registro de la temperatura y humedad del ambiente del laboratorio para conocer el número de horas durante las cuales estos parámetros se mantenían dentro de un intervalo razonablemente estable y de poca influencia sobre el proceso de hidratación del cemento.

#### 3.2.4.1.- Pastas de cemento

Una vez concluido el período de entrenamiento en el manejo de equipo y métodos experimentales, se procedió a tomar una

muestra de tres kilos de cada saco de cemento hasta obtener -- una cantidad igual a 60 kilos, todas las muestras se mezclaron y envasaron en bolsas de polietileno que, posteriormente, se guardaron en cubetas de plástico con tapas herméticas. Esto se hizo para evitar que el cemento adquiriera humedad del ambiente y prevenir su carbonatación. Asimismo se destilaron 60 litros de agua que se guardaron en garrafones de vidrio, que previamente se lavaron con ácido clorhídrico y enjuagaron con --- agua destilada.

El mezclado de pastas se hizo en una batidora de laboratorio marca Hobart, de tres velocidades, el procedimiento de mezclado fue el especificado en la norma NOM-C-85, en el caso de las muestras con aditivo, éste se agregó al final del mezclado estándar y se remezcló por un minuto adicional. Siempre se utilizó agua destilada para el mezclado y se controló por peso y temperatura. La relación agua-cemento varió entre 0.25 y 0.45- y el contenido de aditivo entre 0.25 y 5 por ciento.

#### 3.2.4.2.- Pruebas en estado plástico

Inmediato al mezclado estándar, se determinó la fluidez de las pastas por medio de una prueba, que aunque no está estandarizada si se acepta como adecuada para medir la liquidez de las pastas de cemento y se conoce con el nombre de "minirevenimiento" por su semejanza con la prueba de revenimiento pa-

ra el concreto. En este caso se utiliza un cono con el 25 por ciento de las dimensiones del cono estándar, la medida de fluidez se puede hacer midiendo la diferencia de alturas o el diámetro que alcanza la pasta al extenderse sobre una superficie-- después de que se retira el cono, en las figuras 25 y 26 se -- muestra el cono, sus dimensiones y la forma de medir la fluidez.

En el caso de las mezclas con aditivo, la medida de fluidez se registró antes y después de agregar el superfluidificante. También se separó una porción de la pasta para determinar la pérdida de la liquidez en función del tiempo.

Se registró el peso volumétrico de las pastas antes y después de agregar el aditivo y paralelamente se determinó el --- tiempo de fraguado y temperatura de reacción, esta prueba que se considera de gran importancia se realizó en condiciones --- adiabáticas. Consistió en colocar una cantidad de pasta dentro de un envase de plástico con tapa hermética, a la que se le --- practicó un orificio por el que se introdujo un sensor electrónico de temperatura y cuya aproximación es de una centésima de grado.

El envase de plástico se encapsuló en cubo de poliestireno expandido, para garantizar que no se perdiera o ganara calor del exterior. El registro de temperaturas se hizo a inter-

valos fijos de 20 minutos en las primeras dos horas, de 10 minutos las siguientes tres horas, nuevamente cada 20 minutos -- hasta que la temperatura comenzó a descender y una lectura final a las 24 horas. En las figuras 27 a 29 se muestran los procedimientos y equipo para las determinaciones de peso volumétrico, tiempo de fraguado y temperatura de reacción.

Una prueba que por lo meticuiloso y laborioso del procedimiento resultó difícil, fue la que se realizó para determinar la velocidad con que se generó hidróxido de calcio durante las primeras 24 horas de reacción de hidratación de las pastas. Esta prueba consistió en tomar una muestra de pasta cada 10 minutos durante las primeras 6 horas y cada 6 horas hasta 24 horas después de agregar el agua de mezclado.

Cada muestra se dispersó en 500 mililitros de agua destilada agitando violentamente durante 15 segundos. Se registró -- el peso de un filtro Wattman-rápido sin cenizas y la mezcla -- dispersa se filtró, los sólidos se lavaron con 500 ml. de acetona y se colocaron junto con el filtro de un horno a 110°C -- donde permanecieron 24 horas. El agua del filtrado se mantuvo -- sobre una parrilla con agitación magnética hasta que alcanzó -- una temperatura igual a 45°C, esto se hizo para evitar una posible cristalización del hidróxido de calcio en solución.

Una vez que el agua del filtrado tenía la temperatura de--

seada, se refiltró a través de un filtro Wattman-lento, con lo que las partículas de cemento que se habían colado del filtrado anterior se eliminaron totalmente. Se tomó una muestra de 10 ml. la que se separó en 2 de 5 ml. una para determinar calcio libre según la norma NOM-C-131 y otra para espectrofotometría de ultravioleta y visible. En las figuras 30 a 32 se muestran algunos pasos de este procedimiento.

#### 3.2.4.3.- Pruebas en estado endurecido

Como el estudio pretende establecer relaciones entre modificaciones a nivel microestructura y comportamiento mecánico de pastas y concreto, se consideró que la resistencia a compresión podría ser el parámetro de liga entre estos dos aspectos. Por lo que, después del procedimiento de mezclado se colaron 30 cilindros de 2 cm. de diámetro por 4.4 cm. de altura.

Para fabricar estos especímenes fue necesario cortar un tubo de poliestireno en segmentos de 5 cm. de largo, se maquinaron para dejar los extremos paralelos y en un plano perpendicular al eje del cilindro. Antes del colado, se tapó uno de los extremos con un plástico termo-retráctil y se asentaron sobre un vidrio, al final del colado, a cada cilindro se le dio un acabado en la superficie y se le colocaron tapas de plásticos termo-retráctil.



El objeto de las operaciones anteriores fue el de garantizar la permanencia del agua de mezclado y que la superficie inferior de cada cilindro fuera plana y perpendicular al eje del espécimen para evitar el cabeceo con azufre, la superficie superior se cortó en una mesa para corte de muestras que tiene montado un disco de diamante de 1.6 mm. de espesor. Después -- del corte se checó que las caras superior e inferior fueran -- planas y paralelas, así como la longitud del cilindro, la cual se mantuvo en 4 cm.  $\pm$  1 mm.

El curado de cilindros se hizo en agua a  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura y saturada con cal. El curado varió entre 1 y 90 días, al final de los cuales se procedió a probar su resistencia por compresión. Para este ensaye se usó una máquina universal de ensayos marca Losenhousewark con capacidad de 10 tn y aproximación de 5 kg. En las figs. 33 a 36 se muestra el colado, curado, corte y ensaye de especímenes.

3.2.4.4.- Preparación de muestras para rayos-x, análisis térmico, infrarrojo, calcio libre, microscopía electrónica, agua de cristalización y calor de hidratación.

Después de romper los cilindros por compresión, se tomó de cada espécimen una muestra, se sumergió en acetona dentro de un vaso de precipitado y se pulverizó con la ayuda de un mortero, posteriormente se evaporó la acetona y la muestra pulverizada-

se metió en un horno a 110°C por 24 horas al final de las cuales se separó en fracciones de tamaño adecuado para las determinaciones de rayos-x, análisis térmico, infrarrojo, calcio libre, agua de cristalización y calor de hidratación. Para microscopía electrónica se emplearon fragmentos de diámetro aproximado a 5 mm.

Para rayos-x se empleó una muestra de 2 gramos, la que se colocó en un portamuestras y dentro de la cámara de radiación, figs. 37 y 38, las condiciones de ensaye fueron 2/min, 25 amps. 36 kv, intensidad 2 x 10 y sin supresión de ruido, el equipo -- que se empleó fue un Phillips con blanco de cobre.

En el análisis térmico se emplearon muestras de 20 mg para termo-gravimetría y de 15 mg para térmico diferencial, el equipo fue un Perkin-Elmer con graficador y microprocesador integrado. Las condiciones de ensaye fueron: velocidad de calentamiento 20°C/min, intervalo de 30 a 1100°C y atmósfera de nitrógeno, fig. 38.

La respuesta al infrarrojo de las pastas de cemento con y sin aditivo se determinó en un espectrofotómetro de infrarrojo marca Nicolet microcomputarizado, fig. 40, con capacidad de lectura de espectro entre 4000 y 300  $\text{cm}^{-1}$  de número de onda.

Las muestras fueron de 4 mg. montados en bromuro de pota-

sio (Kbr). El montaje se hizo mezclando la muestra con 96 mg. de Kbr en polvo, la muestra se colocó en un portamuestras y se comprimió hasta formar una pastilla transparente, sobre la que se realiza la prueba.

Las pruebas para determinar calcio libre, agua de cristalización y calor de hidratación se hicieron de acuerdo a las normas oficiales mexicanas NOM-C-131 y C-151. El estudio morfológico se hizo con un microscopio electrónico de barrido marca Jeol, fig. 41, los fragmentos de 5 mm. de diámetro, secos al horno, se montaron en portamuestras de nylon, pegándolos con pegamento de plata, posteriormente se sombrearon, primero con grafito grado espectrográfico y después con oro también puro, en la figura 42 se ilustra el portamuestras y muestras ya sombreadas. Los sólidos que se recuperaron de los filtrados descritos en la sección 3.2.4.2, se prepararon de la misma manera que las muestras obtenidas de los cilindros y se les hizo la misma serie de pruebas que las descritas anteriormente.

#### 4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE CONCRETOS SUPERFLUIDIFICADOS.

Con el objeto de facilitar la interpretación de los resultados de las pruebas, los valores de cada uno de los parámetros determinados experimentalmente se presentan ordenados en tablas y en los casos en que se consideró necesario, estos valores se representan en gráficas con las que se muestra la tendencia de una característica del concreto a mejorar o disminuir de valor.

##### 4.1.- Propiedades en estado plástico

En las tablas 16 a 21 se muestran las características de los concretos superfluidificados con relaciones agua-cemento de 0.35 y 0.45, respectivamente.

En las tablas 16 y 19 se muestran las propiedades mecánicas, fluidez, por ciento de aire y peso volumétrico de los concretos con relaciones agua-cemento iguales a 0.35 a 0.45, en relación con el tipo y dosis de aditivo superfluidificante. Se observa que el revenimiento se duplica con una dosis igual a 0.25 por ciento y que al duplicar la dosis el revenimiento es cuatro veces mayor que el inicial para cualquiera de los aditivos. Asimismo, se observó que a partir de 0.75 por ciento el revenimiento es mayor de 25 cm.

El contenido de aire decrece de manera proporcional al -- por ciento de aditivo. De las mismas tablas se puede deducir -- que existe una buena relación entre el contenido de aire y el peso volumétrico. Aunque algunos valores no son los esperados -- es evidente que un incremento en la dosis de aditivo mejora la compactación del concreto, lo que se refleja en un incremento -- en el peso volumétrico y una mayor exoulsión de aire atrapado.

En las tablas 17 y 20 se muestran los tiempos de fraguado y pérdidas de revenimiento de estos concretos, en función del tiempo, dosis y tipo de aditivo. De estas tablas queda claro -- que los aditivos retrasan el fraguado del concreto proporcionalmente a la dosis y que los de melamina sulfonatada ( tipo -- B ) influyen menos que los de naftaleno ( tipo A ).

En cuanto a las pérdidas de revenimiento es evidente que, fig.43, para dosis menores de 0.5 por ciento el efecto fluidificante tiene una duración aproximada a 15 minutos promedio, -- después de los cuales las mezclas se comportan de manera simi -- lar a la mezcla testigo. Para dosis mayores se observa que el efecto perdura hasta un valor cercano a 60 minutos y que des -- pués de este lapso la pérdida de revenimiento es muy rápida. -- ya que en menos de 15 minutos pierden el 50 por ciento de flui -- dez y nuevamente su comportamiento es similar al de la mezcla -- sin aditivo.

#### 4.2.- Propiedades en estado endurecido

En las tablas 16 y 19 se muestran los valores de resistencia a compresión y flexión, así como los módulos elásticos de los concretos con relación agua-cemento de 0.35 y 0.45 respectivamente, según la edad de ensaye y el tipo y dosis de aditivo superfluidificante.

De estas tablas se observa, principalmente, que las resistencias a compresión y módulos elásticos aumentan en relación a la dosis de aditivo hasta un límite próximo a 0.75 por ciento para el concreto con relación agua-cemento igual a 0.35 y de 0.5 por ciento para el concreto de relación agua-cemento igual a 0.45

El comportamiento a flexión de los concretos superfluidificados resultó, de manera general, similar al que muestran a compresión aunque no en forma tan clara, en especial llama la atención la resistencia a flexión de 28 días del concreto con relación agua-cemento igual a 0.45, la cual se mantiene prácticamente constante sin importar el tipo y dosis de aditivo.

En las tablas 18 y 21 se muestran los resultados de las pruebas de congelación y deshielo en función del tipo y dosis de aditivo superfluidificante, según la edad de ensaye y relación agua-cemento.

Para construir estas tablas se utilizó el número de ciclos en lugar de los valores del factor de durabilidad y del factor de durabilidad relativo, porque de esta manera es más fácil -- distinguir diferencias entre concreto con y sin aditivo.

En las dos tablas se observa que, en general para dosis - de aditivo próximas al 0.75 por ciento y relación agua-cemento igual a 0.35 la resistencia a congelación y deshielo tiende a incrementarse. Lo mismo puede decirse del concreto con rela--- ción agua-cemento de 0.45 a 0.50 por ciento de aditivo. Sin em bargo, existen diferencias entre los aditivos, pues aparente-- mente la tolerancia al aditivo tipo B es mayor que al tipo A.

De estas tablas también puede observarse que para dosis - iguales a 0.25 por ciento de aditivo el número de ciclos siem pre es mayor al de los concretos testigo, sin importar la edad y tipo de aditivo, aunque se nota que con el superfluidifican te tipo B hay una tendencia a superar los valores del tipo A.

Cuando el por ciento de aditivo es mayor de 0.25 y menor del óptimo aparente el número de ciclos a 7 días de edad decre ce cuando se usa aditivo tipo A y tiende a ser igual al valor de los concretos testigo cuando se emplea el tipo B. Aunque se puede deducir que la tendencia general es a disminuir la dura bilidad a 7 días de edad.

A 28 días de edad, los concretos con aditivo tipo A muestran un ligero incremento en la resistencia a congelación y -- deshielo comparados con los testigos. Cuando el aditivo es del tipo B, se nota una mejoría franca siempre y cuando el por --- ciento de aditivo se mantenga por debajo de 0.75 y 0.5 respectivamente.

Cuando el por ciento de aditivo supera los valores críticos de durabilidad a 7 y 28 días decrece notablemente, en especial cuando se usa superfluidificante tipo A. Sin embargo a 90 días se observa, como tendencia general, que los números de ciclos aumentan en una proporción diferente a la que muestran -- los concretos sin aditivo y los que contienen menos de 0.75 -- por ciento.



## 5.- INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS SUPERFLUIDIFICANTES SOBRE EL -- PROCESO DE HIDRATACION Y PROPIEDADES DE LAS PASTAS DE CE-- MENTO TIPO PORTLAND.

### 5.1.- Pruebas en estado plástico

#### 5.1.1.- Determinación de peso volumétrico y fluidez

En el caso de las pastas de cemento, las variaciones de peso volumétrico cuando se añade un aditivo superfluidificante son prácticamente nulas, como lo demostraron las pruebas realizadas. Se puede mencionar que las diferencias significativas se observaron sólo entre pastas con y sin aditivo para relaciones agua-cemento de 0.25 y 0.27, que puede atribuirse a deficiencias de compactación y a un mayor contenido de aire atrapado durante las operaciones de mezclado.

La fluidez de las pastas con y sin aditivo se midió por medio de la prueba conocida como minirevenimiento, en la figura 44 se muestran algunos valores representados en forma gráfica y que se considera dan una idea general de la manera en que se comportan las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27 y contenidos de aditivo entre 0 y 1.5 por ciento.

Como comentario general de estas pruebas, se puede mencionar que el comportamiento mostrado por las pastas es similar

al de los concretos, en cuanto a la adquisición de fluidez, -- sin embargo, las pérdidas de liquidez son relativamente menores, es decir, las pastas pierden fluidez a menor velocidad -- que los concretos, y que cuando se incrementa el por ciento de aditivo por encima del 0.5 por ciento, la fluidez de la pasta tiende a mantenerse constante.

#### 5.1.2.- Influencia del tipo y dosis de aditivo superfluidificante en el tiempo de fraguado de las pastas de cemento.

En las tablas 22 y 23 se reportan los tiempos de fraguado registrados durante las pruebas realizadas sobre pastas de cemento con relaciones agua-cemento de 0.27 y 0.35 respectivamente y en función del tipo y dosis de aditivo superfluidificante.

Como tendencia general, se observa que el efecto de los aditivos es el de retardar el fraguado proporcionalmente a la dosis, así como que el aditivo tipo B influye menos que el tipo A. En el caso de las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27 y contenidos de aditivo menores del 0.75 por ciento el tiempo de fraguado prácticamente no se altera.

Comparando los valores de las tablas, es claro que a mayor relación agua-cemento, la influencia del aditivo sobre el tiempo de fraguado es más pronunciada, pues si se toma como pa

rámetro de comparación el 2.5 por ciento de aditivo, se observa que para una relación agua-cemento de 0.27 el retraso es de unas tres horas, mientras que para 0.35 de relación agua-cemento el retraso del orden de seis horas.

### 5.1.3.- Efecto de los aditivos sobre la temperatura de reacción de hidratación de las pastas de cemento.

Determinar las temperaturas que se generan durante la reacción de hidratación, temprana, de las pastas de cemento, tiene importancia porque permite conocer con mayor precisión cuando tiene lugar el fraguado inicial y el final, así como establecer la duración del período conocido como "de latencia".

Cualquier modificación en el lapso requerido para que la temperatura de la pasta comience a incrementarse, hasta alcanzar un máximo, indica que la cinética del proceso de hidratación se ha alterado y en el caso de las pastas superfluidificadas, que el aditivo es el responsable del fenómeno, siempre y cuando la prueba se realice en condiciones adiabáticas.

En las figuras 45 y 46 se muestra la representación gráfica de las lecturas de temperatura registradas a intervalos fijos y para cada uno de los por cientos de aditivo empleados. En la figura 45 se muestra el comportamiento de las pastas con aditivo tipo A y relación agua-cemento igual a 0.27 y en la figura 46 el efecto del superfluidificante tipo B.

En general se observa que tanto el tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima, como el período de latencia se incrementan proporcionalmente al contenido de aditivo. Es importante notar que a pesar del cambio en la geometría de las curvas, las cuales muestran una tendencia a la simetría, la variación de la pendiente durante el período de aceleración de la reacción de hidratación no sufre un cambio drástico, aunque sí se presenta un incremento en la velocidad de reacción.

De estas figuras se puede deducir que las temperaturas máximas están en función de la cantidad de aditivo, aumentan proporcionalmente hasta un límite cercano al 1.5 por ciento de superfluidificante y a partir de este valor decrecen nuevamente. Comparando las figuras entre sí, se aprecia que el aditivo tipo B produce mayor aceleración en la reacción de hidratación que el tipo A, así como una reducción en el período de latencia para contenidos iguales de aditivo y las máximas son, en promedio, 2°C mayores que las que alcanzan las pastas con superfluidificantes tipo A.

#### 5.1.4.- Determinación del por ciento de aditivo adsorbido en la superficie de las partículas de cemento.

La cantidad de aditivo adsorbido superficialmente por las partículas de cemento, se determinó por espectroscopía de absorción de ultravioleta en la banda de 220 a 230 nanómetros.

debido a la presencia del grupo sulfonatado de los aditivos.-- Este grupo de pruebas se hizo nada más a las pastas con relaciones agua-cemento de 0.27 y 0.35

La fase líquida, separada por filtrado al vacío, se diluyó hasta obtener una concentración óptima para su registro por el equipo de ultravioleta, para lo cual fue necesario hacer -- una serie de diluciones sucesivas acompañadas de corridas en el aparato hasta que las lecturas quedaron dentro de la escala de registro. Una vez que se logró esto, se procedió a disminuir el PH de las soluciones hasta un valor igual a 6.5, con el objeto de evitar interferencias del hidróxido de calcio libre presente en las diluciones.

La cantidad de aditivo adsorbido se estableció por diferencia de concentración referidas a una curva de calibración -- que representa el contenido de superfluidificante en cada una de las pastas.

En la figura 47 se muestra de manera gráfica el resultado de estas pruebas, para contenidos de aditivo entre 0 y 1 y 1.5 por ciento. No se reportan valores por encima de 1.5 por ciento de superfluidificante porque claramente la adsorción tiende a ser constante, así mismo sólo se reportan los resultados del aditivo tipo A, porque el tipo B no mostró diferencias importantes.

Se observa en esta figura que la adsorción de aditivo sobre la superficie de los granos de cemento es función del porcentaje de superfluidificante añadido a la pasta de cemento y de la relación agua-cemento, esto último no se puede asegurar totalmente debido a que sólo se probaron dos relaciones agua-cemento, aunque tiene muchas probabilidades de ser cierto.

#### 5.1.5.- Influencia del aditivo sobre la hidratación temprana de los compuestos del cemento.

De cada una de las pastas con relaciones agua-cemento --- igual a 0.27 y 0.35 se tomó una muestra cada 10 minutos, la -- cual se preparó según la forma descrita en las secciones 3.2.4.2. y 3.2.4.4. las determinaciones del grado de hidratación de los cuatro compuestos principales del cemento tipo portland se hizo por difracción de rayos-x, tomando como patrón de referencia el difractograma del cemento sin hidratar y las intensidades relativas, medidas en los ángulos de mayor difracción.

Así, el grado de hidratación, en función del tiempo, tipo y dosis de aditivo, se determinó para los silicatos de calcio en la línea de los 29.35, para el aluminato tricálcico en --- 35.15 y el ferroaluminato tricálcico a los 33.8. Con los valores establecidos a partir de la lectura de los difractogramas se construyeron las gráficas de las figs. 48 a 54.

Las figuras 48 y 49 muestran la velocidad con que se hidratan el  $C_2S$  y el  $C_3S$  de las pastas con relaciones agua-cemento igual a 0.27 y 0.35, fluidificadas con aditivo tipo A, las figuras 50 a 52 reflejan el comportamiento del  $C_3A$  según la relación agua-cemento, dosis y tipo de aditivo, las figs. 53 y 54 el efecto del aditivo tipo A sobre la reacción del  $C_4AF$  para relaciones agua-cemento de 0.27 y 0.35. En todas las figuras se reporta el efecto de los aditivos hasta el 2.5 por ciento con el objeto de facilitar la comparación entre relaciones agua-cemento diferentes.

En las figuras 48 y 49 se observa que para por cientos de aditivo entre 0 y 1.5 en las pastas con relación agua-cemento de 0.27, los superfluidificantes aceleran la hidratación del  $C_3S$  y del  $C_2S$  y que el efecto es ligeramente mayor en el caso del aditivo tipo B. Cuando la relación agua-cemento es de 0.35 se observa que el efecto de aceleración se produce entre 0 y 0.75 por ciento de aditivo.

En las figs. 50 y 51, se puede mencionar de manera general, que los aditivos retrasan la reacción de hidratación del  $C_3A$  y que el efecto es mayor conforme aumenta el por ciento de aditivo y la relación agua-cemento. También es notable que la influencia del superfluidificante tipo A es mayor que la que muestra el tipo B.

En las figuras 52 y 53 se muestra la respuesta del  $C_4AF$  a la presencia de aditivos. Las observaciones sobre estas figuras son similares a las expuestas para el  $C_3A$ .

## 5.2.- Resultados de las pruebas de pastas en estado endurecido

### 5.2.1.- Resistencia a compresión.

En las tablas 22 a 26 se muestran los resultados de las pruebas de compresión y en las figs. 54 a 60 la representación gráfica de estos valores. La observación general de estas tablas y figuras es que la resistencia a compresión está claramente relacionada con el contenido de aditivo y que la influencia del superfluidificante es mayor si la relación agua-cemento es menor, también que el tipo de aditivo influye relativamente poco.

De las tablas y figuras se puede deducir que existe un por ciento de aditivo óptimo según la relación agua-cemento, para el cual se obtienen resistencias a compresión máximas. En particular, de las figuras 58 y 59 donde se muestra la velocidad con que las pastas adquieren resistencia en función de la edad, se observa que la tendencia, para valores de aditivo por debajo del óptimo, es la de igualar a la mezcla testigo por lo que se podría deducir que la resistencia a compresión a largo plazo no se afecta significativamente si el por ciento de adi-



tivo es menor del óptimo, también que para contenidos de superfluidificante mayores, la resistencia mecánica de la pasta si se afecta de manera negativa.

### 5.2.2.- Agua de cristalización

El conocimiento de la cantidad de agua de cristalización o agua estructurada químicamente, permite establecer con mayor precisión el grado de hidratación de una pasta de cemento, además de que mediante las fórmulas derivadas de las relaciones de Powers se puede calcular la resistencia a compresión de una pasta usando como parámetros la relación agua-cemento y el agua de cristalización.

En las figuras 54 a 57 se muestra de manera comparativa las resistencias obtenidas y calculadas en función del porcentaje de aditivo, se observa que las tendencias son similares y que los valores se acercan para contenidos de aditivo entre 0.25 y el óptimo, después de esto existe mayor discrepancia, atribuible a la presencia de etringita, la cual no colabora significativamente a la resistencia y estructura 32 moléculas de agua cuando se forma, esto último se confirma si se comparan las figs. 54 y 55 con la 56 y 57, que muestran resultados a 7 y 28 días, es claro que las diferencias son mayores a 7 días, cuando el porcentaje de etringita es mayor.

### 5.2.3.- Calcio libre

Hasta este punto puede deducirse que los aditivos superfluidificantes aceleran la reacción de hidratación y que si se determina el contenido de calcio libre en las pastas hidratadas, los valores deben mostrar una tendencia similar al de las resistencias y por ciento de agua de cristalización. Sin embargo, contrario a lo esperado, a primera vista aparece que el contenido de calcio libre disminuye conforme aumenta el porcentaje de aditivo, este hecho revelaría que las reacciones se retrasan, especialmente las de los compuestos  $C_3S$  y  $C_2S$ , que son los que liberan  $Ca(OH)_2$  y por lo tanto a mayor reacción debería liberarse más calcio.

La incongruencia entre los resultados de resistencia y calcio libre, sugiere que el hidróxido de calcio reacciona químicamente con los aditivos, por lo que para comprobarlo se hicieron varias pruebas por espectrofotometría de infrarrojo y una serie de experimentos adicionales consistentes en mezclar diluciones acuosas al 15 por ciento de hidróxido de calcio, de calidad analítica, con aditivo superfluidificante. Si existe reacción entre el aditivo y el calcio deben formarse sulfatos, lo cual sucedió. Lo más interesante de este hecho, es que la reacción requiere entre 15 y 30 minutos para temperaturas entre 25 y 17°C respectivamente.

#### 5.2.4.- Respuesta al infrarrojo de las pastas con y sin aditivo.

En las figuras 61 a 64 se muestra la respuesta al infrarrojo de las muestras de pastas de cemento con relación agua-cemento igual a 0.27, hidratadas 7 y 28 días y con adiciones de 2 y 4 por ciento de superfluidificante tipo A.

En estas figuras se observa, en general, un corrimiento de los picos en las bandas correspondientes a los sulfonatos, -1050, 670 y 390  $\text{cm}^{-1}$  de número onda. Esto indica que el aditivo reacciona con el hidróxido de calcio libre de las pastas de cemento hidratadas para formar sulfato de calcio. Las figs. 63 y 64 muestran los espectros, empleados, entre las bandas de --700 a 390  $\text{cm}^{-1}$ , donde se aprecia claramente el corrimiento de los picos y las diferencias de intensidad referidas al espectro del aditivo. También es notable la aparición de picos no presentes en las mezclas testigo.

Estas pruebas junto con las descritas anteriormente comprueban la sospecha de que el aditivo reacciona químicamente con los productos de hidratación, los que a su vez intervienen en la reacción de hidratación de los compuestos del cemento.

### 5.2.5.- Difracción de rayos-x

En las figs. 65 a 68 se muestran los difractogramas de -- pastas con relaciones agua-cemento de 0.27 y 0.35, hidratadas -- durante 7 y 28 días con por cientos de aditivo de 0, 2 y 4, -- respectivamente.

En las figuras 65 y 66 se observa que la intensidad del -- pico correspondiente al hidróxido de calcio (HC) localizado a -- 19 muestra mayor intensidad que el correspondiente a las pas-- tas con 2 y 4 por ciento de aditivo, así mismo y desde un pun-- to de vista relativo, la pasta con 4 por ciento muestra menos-- contenido de (HC). También es notable que la intensidad del pi-- co de etringita ( Etgta ) localizado a 42°, es mayor para las-- mezclas con 4 por ciento de superfluidificante. Este último -- efecto permanece hasta los 28 días figs. 67 y 68. De este gru-- po de figs. es claro que el aditivo tipo A influye más que el-- tipo B.

Las figuras permiten comprobar la reacción del aditivo -- con los productos de hidratación, la formación de sulfato de -- calcio y la reacción de éste con el aluminato tricálcico, ya -- que la presencia de etringita después de 28 días indica un ex-- ceso de yeso, el cual como se sabe se adiciona al cemento para -- retardar la reacción del  $C_3A$ , cuyo producto de hidratación es-- precisamente la etringita.

5.2.6.- Influencia de los aditivos en la morfología microestructural de las pastas hidratadas a 7 y 28 días de edad.

El estudio de la morfología microestructural de las pastas de cemento, resultó, además de interesante, ser de gran ayuda para entender el comportamiento mecánico de pastas y concretos, la pérdida de durabilidad que presenta el concreto cuando se exceden las dosis óptimas de superfluidificante y para corroborar una serie de evidencias y sospechas, producto de los resultados de otras pruebas y determinaciones efectuadas previamente.

El microscopio electrónico de barrido permitió establecer diferencias morfológicas a edades muy tempranas, como las mostradas en las micrografías de las figuras 69 y 70, en la primera se observa claramente el grado de hidratación de los granos de cemento en una pasta sin aditivo y relación agua-cemento igual a 0.27 a 6 horas de edad, en la segunda una pasta con la misma relación agua-cemento y edad pero con 0.75 por ciento de superfluidificante.

En la fig. 69, sólo aparecen cristales de etringita (agujas) creciendo sobre la superficie de los granos de cemento y precipitaciones de hidróxido de calcio. En la fig. 71 es claro que los cristales de etringita están más desarrollados, la su-

perficie de los granos aparece más atacada por el agua y en el extremo superior izquierdo se observa el crecimiento incipiente de cristales de tobermorita (plateletas). Otro aspecto distintivo entre las dos micrografías es la distribución granular y menor espacio libre entre partículas que muestra la figura - 70.

En las figs. 71 y 72 se muestran las micrografías de las mismas pastas pero a 7 días de edad. La fig. 72 es de la pasta sin aditivo, se observa al centro una formación de cristales de tobermorita cerrando el espacio disponible en poros del orden de 20 micras y en general una microestructura más abierta que la de la pasta de la fig. 71, en esta micrografia claramente se observan poros menores de dos micras. Como característica principal se observan formaciones importantes de tobermorita, parte superior, así como la permanencia de etringita en poros del orden de 10 micras.

En general las pastas con por cientos de aditivo superiores al óptimo presentaron retrasos importantes en el tiempo de fraguado, así como pérdidas de resistencia notables, esto permite deducir que la reacción de hidratación se retarda, posiblemente por la existencia de un mayor contenido de sulfato de calcio en la mezcla, que al reaccionar con el aluminato tricálcico genera etringita, la cual participa muy poco en la resistencia mecánica del material.

Las micrografías de la fig. 73 muestran grandes formaciones de cristales de etringita en las pastas de cemento con relación agua-cemento igual a 0.35 y 2.5 por ciento de superfluidificante tipo A, hidratados 7 días, cuando se supone que la etringita ya cambió a monosulfato. La presencia de estos cristales parece justificada en las micrografías de la misma pasta pero a 3 días de edad, fig. 74

En la figura 74 se muestran cristales de sulfato de calcio, el cual se supone que se consume totalmente en 24 horas, del lado derecho se muestra un acercamiento en el que se observa que estos cristales tienen una estructura fibrosa que no es muy común, ya que por lo general su geometría presenta caras lisas y rectangulares, además de aparentar transparencia. Estas formaciones dan la idea de agrupaciones microcristalinas de sulfato de calcio.

Uno de los aspectos morfológicos distintivos entre pastas con y sin aditivo, para por cientos de superfluidificante por debajo del óptimo, es la formación de cristales de hidrosilicatos de calcio. En la micrografía de la figura 75 se muestran los cristales de una pasta con relación agua-cemento igual a 0.27 sin aditivo e hidratada 28 días, se observan cristales de tobermorita grandes, en forma de plateletas, de espesor próximo a tres micras. La fig. 76, pasta con aditivo misma edad, muestra formaciones semejantes, pero los cristales tienen espe

sores menores de una micra, además de llenar, prácticamente, todo el espacio disponible.

En el capítulo 2, se menciona que P.K. Mehta ref. 38, atribuía las diferencias en resistencia a la compresión entre pastas con y sin aditivo, a una fragmentación temprana del sistema capilar, lo cual parece verificarse en la secuencia de micrografías presentada en la figura 77 a, b y c, donde se observa que a tres días los poros con diámetros aproximados a 20 micras se llenan de cristales de hidrosilicatos de calcio, a 7 días, micrografía (b), casi todos estos poros se han cerrado con el mismo tipo de cristales y a 28 días fig. 77 c, la microestructura es muy compacta y solo se aprecian poros de diámetro aproximado a una micra.

Un hecho sorprendente y que posiblemente de explicación al comportamiento mecánico y resistencia a la congelación y deshielo que muestran las pastas y concretos con superfluidificantes es la que se muestra en las figs. 78 a 81, en la fig. 79 se muestra una pasta con relación agua-cemento igual a 0.45 y 2.5 por ciento de aditivo, en ella se aprecia claramente un profuso microagrietamiento, con anchos de grieta próximos a una micra, en la fig. 78, correspondiente a una pasta con relación agua-cemento igual 0.35 y 2.5 por ciento de aditivo también se observan las mismas grietas así como la presencia de cristales de yeso y etringita, que para la edad de 14 días que



tienen estas pastas, se supone que no deberían existir.

La micrografía de la fig. 80 muestra un acercamiento de una de las grietas de la fig. 78, en esta micrografía, magnificada 10,000 veces se observa claramente que el ancho máximo de las grietas es de una micra, y que tanto la superficie de la pasta como la grieta están cubiertas de cristales de etringita de 0.5 de micra de largo por 0.1 micras de diámetro.

En la micrografía de la fig. 81, se magnifica 14,000 veces la grieta de la fig. 79. En esta micrografía se aprecia -- que la etringita cubre casi en su totalidad el ancho de la --- grieta, que en este caso tiene 1.5 micras, la cantidad de cristales de etringita es mayor que para el caso de la fig. 79, lo cual es razonable por tratarse de una relación agua-cemento ma yor.

## 6.- INTERPRETACION DE RESULTADOS

### 6.1.- Peso volumétrico y contenido de aire

De las pruebas realizadas sobre concretos de cemento tipo portland, es claro que los aditivos superfluidificantes permiten mejorar la compactación y reducir el contenido de aire, -- con lo que se logra incrementar el peso volumétrico de las mezclas. Esto se debe a que la pasta fluidificada tiene menor viscosidad y mayor capacidad de lubricación producida por la carga eléctrica que dispersa a las partículas de cemento, la carga la proporciona el radical  $SO_3^-$  del aditivo.

### 6.2.- Pérdidas de revenimiento

Las pruebas efectuadas para conocer la velocidad con que las mezclas de concreto pierden revenimiento mostraron un alto grado de concordancia con lo reportado en la literatura, en especial con los artículos de Hattori, ref. 14 a 16, uno de los aspectos que repitió de manera similar fue el intervalo de 15- minutos figs. 5 a 9, por lo que se puede pensar que este investigador describe correctamente el fenómeno de floculación, pero no la causa.

Se estima que las pérdidas de revenimiento se deben a una reacción química entre el hidróxido de calcio liberado como --

producto de hidratación de los silicatos de calcio,  $C_3S$ ,  $C_2S$  y el radical  $SO_3^-$  de los aditivos. Según demostraron las pruebas adicionales efectuadas diluciones de hidróxido de calcio puro y aditivo, en proporciones semejantes a las que se presentan en la pasta de cemento. En estas pruebas se observó que después de un lapso que varía entre 15 y 20 minutos y que depende de la temperatura ambiente, se forma sulfato de calcio.

Lo anterior implica que cuando se lleva a cabo esta reacción, el aditivo, pierde solubilidad, la cual se debe precisamente al radical  $SO_3^-$ . De las determinaciones por ultravioleta, es claro que el cemento adsorbe una cantidad de aditivo en su superficie y deja otra libre en la fase líquida, la cual se adsorbe en los productos de hidratación, de los cuales el mayor volumen lo constituye el hidróxido de calcio con el cual reacciona. Una vez que se consume el  $SO_3^-$  del aditivo no adsorbido en la superficie de los granos de cemento, la reacción prosigue, liberando más calcio que a su vez comienza a reaccionar con el aditivo adsorbido por las partículas de cemento, los cuales pierden carga negativa y se flocculan.

Es notable que conforme el por ciento de aditivo, por encima de 0.5 por ciento, para el cual la adsorción parece óptima, fig. 47 el tiempo durante el cual las mezclas permanecen fluidas es mayor, así para por cientos del orden de 1.5 por ciento las pérdidas de revenimiento ocurren después de 45 minu

tos a partir de los cuales se requieren 15 minutos adicionales para que la mezcla tenga un revenimiento similar al del concreto testigo.

### 6.3.- Resistencia mecánica y durabilidad

Los resultados de las pruebas mecánicas demostraron que el concreto y pastas con aditivos superfluidificantes alcanzan mayores resistencias que los testigos hasta un límite de contenido de aditivo, el cual está en función de la relación agua-cemento. Esto corrobora los reportes de varios autores consultados durante el estudio bibliográfico.

La morfología microestructural, determinada con el microscopio electrónico de barrido, corrobora las aseveraciones de P.K. Mehta, ref. 38, en lo referente a la fragmentación temprana del sistema capilar y a una reducción en el contenido de poros mayores de  $1000 \text{ \AA}$ , lo cual se relaciona con los incrementos de resistencia.

Sin embargo, lo anterior no explica la causa, ni porque las determinaciones de agua de cristalización indican, por los valores superiores a los mostrados por las mezclas testigo, -- que se genera una mayor hidratación en las pastas con aditivo.

Cuando se inicia la reacción de hidratación de las pastas

la fase líquida alcanza un PH próximo a 13, este exceso de alcalinidad disuelve sílice, que reacciona con calcio para formar el hidrosilicato de calcio, pero también sucede que la fase líquida se satura con el hidróxido de calcio proveniente de la reacción del  $C_2S$  y  $C_3S$ , principalmente de este último.

La reacción normalmente se detiene hasta que la concentración de  $Ca(OH)_2$  bajo en la solución, lo que sucede cuando este producto se precipita y cristaliza. Una vez que el contenido de calcio en solución disminuye la reacción prosigue hasta que se vuelve a saturar la fase líquida, nuevamente se detiene la reacción para comenzar otro ciclo.

Si por alguna razón la fase líquida no llega a saturarse la reacción de hidratación de los silicatos prosigue. Este parece ser el caso de las pastas y concretos superfluidificados con productos que contienen sulfonatos.

Se estima que la reacción entre el radical  $SO_3^-$  y el  $Ca(OH)_2$  es la causa de que la fase líquida no se satura, aunque no explica totalmente el mayor grado de hidratación, pues para que esto ocurra se requiere un por ciento adicional de agua. Pero si se analiza el mecanismo de reacción entre el  $SO_3^-$  y el  $Ca(OH)_2$  se observa que:

En el aditivo hay  $NaSO_3^-$ , para que se libere el  $SO_3^-$  se re-

quiere que en la estructura de aditivo permanezca el sodio --- ( $\text{Na}^+$ ), lo cual ocurre si el  $\text{SO}_3^-$  deja un electrón, carga negativamente que compensa al ( $\text{Na}^+$ ).

Al liberarse como  $\text{SO}_3$  y reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  toma un oxígeno del hidróxido, que tiene dos, con esto queda como  $\text{SO}_4^-$ , es decir, queda cargado negativamente, por lo que para compensar la carga desplaza al oxígeno restante, que formará con los dos hidrógenos restantes una molécula de  $\text{H}_2\text{O}$ , el  $\text{Ca}^{++}$  se enlaza con el  $\text{SO}_4^-$  para formar  $\text{CaSO}_4$ , con lo que las cargas se compensan nuevamente.

La molécula de agua liberada se reintegra a la reacción de los silicatos y la molécula de sulfato de calcio, yeso, queda libre y en posibilidad de reaccionar con el  $\text{C}_3\text{A}$ , lo que a su vez explicaría el retraso en el tiempo de fraguado e incremento del período de latencia. Lo cual parece confirmarse en las pruebas de rayos-x, infrarrojo y microscopía, que indican la presencia adicional de sulfato de calcio y de etringita, -- que es el producto de reacción entre el yeso y el aluminato -- tricálcico del cemento.

La etringita tiene una capacidad muy alta de estructurar agua en su ámbito cristalino,  $32\text{H}_2\text{O}$ , así como de adsorberla, -- por su gran superficie específica, la cual se estima que es mayor de  $50 \text{ m}^2$  por gramo, esto quiere decir que su persistencia-

en la microestructura de las pastas resulta deletérea, porque la vuelve más sensible a los cambios de humedad ambiente.

Ya que produce micro-agrietamiento al expandirse por efecto del agua adsorbida.

Si un concreto, fluidificado con un por ciento de aditivo adicional al óptimo se somete a ciclos de congelación y deshielo, sufrirá daños graves en un lapso menor que un concreto sin aditivo, primero por el micro-agrietamiento y segundo porque estas grietas están recubiertas de etringita que produciría expansiones al saturarse de agua, abriendo las grietas que darían acceso a un volumen mayor de agua. Esto al congelarse aumentará la expansión y por consecuencia las presiones.

Los razonamientos anteriores parecen congruentes con las observaciones y experimentos realizados.

## 7.- CONCLUSIONES

Los resultados de la fase experimental de este trabajo -- permiten concluir que:

- a) El radical  $SO_3^-$ , de los aditivos superfluidificantes, - es el responsable tanto de la extraordinaria fluidificación de las mezclas de concreto y alta capacidad reductora de agua de mezclado, como de los fenómenos asociados a la pérdida rápida de fluidez y modificación - de propiedades físicas y mecánicas que presenta el concreto endurecido.
- b) La base fenomenológica de comportamiento del concreto superfluidificado, reside en la alteración de la cinética de las reacciones químicas que se desarrollan durante el proceso de hidratación de cada uno de los cuatro compuestos principales del cemento tipo portland.
- c) El hidróxido de calcio, liberado durante la reacción química del  $C_3S$  y del  $C_2S$ , juega un papel tan importante, en los mecanismos de alteración del proceso de hidratación del cemento tipo portland, como el  $SO_3^-$ , lo cual se refleja en la modificación que sufren las propiedades reológicas del concreto en estado plástico, - como en las características físicas y mecánicas que adquiere el material endurecido.



- d) La reacción entre el radical  $\text{SO}_3^-$  de los aditivos superfluidificantes y el  $\text{Ca(OH)}_2$  libre de las pastas de cemento se manifiesta en la presencia de yeso en los difractogramas de rayos-x y en las micrografías de las pastas, así como en los resultados de calcio libre.
- e) El  $\text{CaSO}_4$ , producto de la reacción anterior produce retraso en la velocidad de hidratación de  $\text{C}_3\text{A}$ , como lo prueba el mayor tiempo de fraguado de las pastas, los resultados de calor de hidratación y la permanencia de etringita en la microestructura de las pastas.
- f) Las curvas de la fig. 82 se consideran de utilidad para un uso racional de los aditivos superfluidificantes según los intereses y particularidades de una obra de ingeniería donde se requieran estos productos.
- g) Las recomendaciones de los fabricantes para el uso de los aditivos superfluidificantes se mantienen dentro de límites muy conservadores, especialmente para relaciones agua-cemento menores de 0.35.

## BIBLIOGRAFIA

1. ACI-201, "Durabilidad del concreto". Instituto Mexicano del cemento y del concreto México, D.F. 1979. 87p.
2. Brokks J.J. "Properties of ultra-high-strength concrete containing a superplasticizers". Magazine of concrete --- research, dic. 1983, vol. 35, No. 125
- 3.- Brooks J.J. Wainwright P.J., Neville A.M. "Time dependent properties of concrete containing mighty admixture". Superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada, may 1978, pp. 425-450.
4. Cement admixtures association and cement and concrete --- association. "Superplasticizing admixtures in concrete".- Report of a Join Working party, Wexhamsprings. Cement an concrete association. London, England 1976. 32p.
5. Colleparidi M., Corradi. Baldini G. Pavei M., "Influenced- of sulphonated naphtalene on the fluidity of cement pas-- tes". 7th international congress on the chemistry of ce-- ment. Paris 1980. pp. 20-25

6. Collepardi M., Corradi M., Baldini G. and Pavei M., "Hidration of  $C_3A$  in the presence of lignosulfonate-carbonate system on sulphonated naphthalene polymer", 7th international congress on the chemistry of cement. Paris 1980. pp 524-528.
7. Collepardi M and Corradi M., "Influenced of naphthalene-sulphonated polymer based superplasticizers on the strength of ordinary and lightweight concretes". Superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa. Canada. may 1978 pp. 451-480.
8. Collepardi M. and Valente M., "Low slump loss superplasticized concrete", proceeding TRV symposium superplasticizers in concrete; Transportation Research Record No. 420 Washington D.C. January, 1979.
9. Czerning Wolfgang. "Cement chemistry and physics for civil engineers" Wiesbadener graphische betriebe. Wiesbaden 1980 196p.
10. Daimen M. and Roy D.M., "Rheological properties of cement mixes: II zeta potential and preliminary viscosity studies" Int J. Cement and Concrete Research 1979. 9:1,pp103-110

11. Dyer John R. "Application of absorption spectroscopy of organic compounds". Prentice-hall Inc. Engle Wood Cliffs, N.J. U.S.A. 1965. 147p.
12. Ghosh R.S., Malhotra V.M., "Use of superplasticizers as water reducers". Cement. Concrete and aggregates. ASTM. 1979. vol. 1 No. 2. pp 56-63.
13. Grutzeck M., "Air entrainment in mortars and concrete: The effect of superplasticizers/salt combinations". Cement and concrete research. 1984. vol. 14
14. Hattori Kenichi. "Experiences with superplasticizers and Japan", developments and the use of superplasticizers. ACISP-62 Detroit, Michigan, 1979. pp 37-66.
15. Hattori Kenichi. "Cement dispersant agent (water reducing agent ) "Mighty". For the high strength concrete". Kao -- soap company, october 1973. 32p
16. Hattori Kenichi. "Control of slump loss by repeated dosing of mighty superplasticizers" 4th international symposium Monterrey, México. 1979.

17. Hester Weston T., "Field application of high-range water reducing admixtures". Superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, - Canada. may. 1978 pp 533-558.
18. Hester Weston T., "Aditivos de alta capacidad reductores de agua". Revista IMCYC. Vol. 17 No. 101. México, D.F. - sep. 1979.
19. Hewelett Peter, Rixom Royer, "Concreto superfluidificado" revista IMCYC vol. 16 No. 86 México, D.F. Mayo-Junio 1977
20. Hewelett P.C., "The concept of superplasticized concrete" superplasticizers in concrete proceeding of an international symposium held in Ottawa, Canadá. may 1978 p. 1-30
21. Hewelett P.C., "Experience in the use of superplasticizers in concrete proceeding of international symposium held in Ottawa, Canada, may. 1978. p 249-278
22. Illston J.M., Smith A.A., "Concrete timber and metals". The nature and behaviour of structural materials. Van Nostrand, Reinhold company. 1979. 679p.

23. Johnston C.D., Gamble B.R. and Malhotra V.M. "Superplasticizers: effect on properties of fresh and hardened concrete", proceeding of TRB symposium superplasticizers in concrete. Transportation Research Record No. 720. Washington, D.C. January 1979.
24. Kasami H. Ikeda T., Yamane S., "Workability and pumpability of superplasticized concrete-experience in Japan". superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada, may. 1978 . pp. 103-132
25. Kishitani K., Kasami H., Iisuka M., Ikeda T., Kasama Y. and Hattori K., "Engineering properties of superplasticized concretes", development in the use of superplasticizers. ACISP-68 Detroit, Michigan, 1981. pp 233-252
26. Lane R. O. and Best J.F., "Laboratory studies on the effects of superplasticizers on the engineering properties of plain and fly ash concretes". superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada, may 1978. p 379-403.
27. Malhotra V.M. and Malanka D., "Performance of superplasticizers in concrete: Laboratory investigation-part 1". Superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. may 1978 pp673-708.

28. Malhotra V.M., "Superplasticizers in concrete", reprint by mineral sciences laboratories, Canmet, Canada 1978. 19p.
29. Malhotra V.M. "Superplasticizers: their effect on fresh and hardened concrete", edited by V.M. Malhotra 1980. pp 367-420
30. Malhotra V.M. "Progress in concrete technology", Energy Mines and Resources Ottawa, Canada 1980. pp 367-419
31. Malinganam N.P. "Slump loss in flowing concrete", superplasticizers in concrete proceeding of an international symposium held in Ottawa, Canada. may 1978. pp. 649-672.
32. Massaza F., Costa U., B. Ch. "Effect of superplasticizers on the hydration", 7th international congress on the chemistry of cement, Paris, 1980. pp 529-534.
33. Materials research society, "Effect of surface and colloid phenomena on properties of fresh concrete", proceeding symposium M. Materials research society annual meeting, november 1982.

34. Mather Bryant, "Test on high range water-reducing admixtures", superplasticizers in Concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa. Canada: May 1978 pp 325-346.
35. M.H. Roberts, B.SC., PHD. and B.W. Adderson, "Tests on superplasticizing admixtures for concrete", magazine of concrete research, june 1983. vol. 35, No. 123
36. Meyer A. "Experience in the use of superplasticizers in Germany", superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. may 1978 pp. 31-48.
37. Mielenz Richar C. and Sprouse James H., "High range water-reducing admixtures: Effect on the air-void system in air-entrained concrete". superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. May 1978. pp 347-378
38. Mor A. and Mehta P.K. "Effect of superplasticizers admixtures on cement hydration", Cement and Concrete Research, Printed in USA. pp. 754-756.



39. Mukherjee P.K. and Chojnacki B., "Laboratory evaluation of a concrete superplasticizing admixture", superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. May 1978. pp 403-424.
40. Neville A.M. "Properties of concrete", Pitman paperbacks. New York 1972. 633 p.
41. Neville A.M. "Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D.F. 1981. Tomo I. - 284 p.
42. Neville A.M. "Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, México, D.F. 1981. Tomo 2, -- 325 p.
43. Neville A.M. "Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, México, D.F. 1981, Tomo 3, -- 401 p.
44. Neville A.M., Dilger W.H. Brooks J.J. "Creep of plain and structural concrete". Longman Inc. New York 1983. 361 p.

45. Perenchio W.F., Whiting D.A., and Kantro D.L. "Water reduction. Slump loss and entrained air void systems as influence by superplasticizers", superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. May 1978. pp 295-324.
46. Portland cement association, "Design and control of concrete mix", eleven edition, July 1968. 121 p.
47. Powers T.C., "The nature of concrete", significance of test and properties of concrete making materials. ASTM - STP 169 B. pp 59-73
48. Powers T.C., "Freezing effects in concrete" durability of concrete. SP-47, ACI. Detroit, Michigan 1975. pp-1-11
49. Quon D.H.H. and Malhotra V.M., "Effect of superplasticizers on slump strength, and degree of conversion of high-alumina cement concrete", development in the use of superplasticizers. ACI SP-68 Detroit, Michigan 1981. pp 173-188.
50. Ramakrishnam V., "Workability and strength of superplasticized concrete", superplasticizers in concrete proceeding of and international symposium held in Ottawa, Canada. May 1978. pp 480-514.

51. Ravindra K. Dhir, and Andrew W.F. Yaa., "Superplasticized high workability concrete: Some properties in the fresh - and hardened states", magazine of concrete research, December, 1983. vol. 35. No. 125.
52. Roy D.M. and Asaga K., "Rheological Properties of cement-mixes: V. The effects of the time on viscometric properties of mixes containing superplasticizers conclusions". Cement and concrete research, 1984. Vol. 14 pp 387-394
53. Seabrook, P.T., Malhotra, V.M. "Accelerated strength of testing of superplasticized concrete and the effect of - repeated doses of superplasticizers on properties of concrete", superplasticizers in concrete proceeding of an - international symposium held in Ottawa, Canada. May 1978 pp 609-648.
54. Slanicka Stefan., "Influence of Water soluble melamine - formaldehyde resin on hydration of  $C_3S$ ,  $C_3A+CaSO_4 \cdot 2H_2O$  - mixes and cement pastes", 7th international congress on - the chemistry of cement. Paris 1980.
55. Soshiroda T., "Segregation characteristics of concrete - containing a high-range water-reducing admixture", development in the use of superplasticizers. ACI SP-68. Detroit, Michigan 1981. pp 121-138.

56. Troxell Davis Kelly, "Composition and properties of concrete", Mc,Graw Hill. Second edition, New York 1968.529 p
57. Van Der Morel. Beutel Pacher, "Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures", elsevier --- scientific publishing company. 1976.
- 58.- Zielinska E. et Zielinski, "Influence du thiosulfate de sodium sur l'hydratation du  $C_3A$ , 7th international congress on the chemistry of cement. Paris. 1980. pp.541-545.

## NORMAS Y METODO DE ENSAYE ESTANDAR

NOM-C-1-1980	Cemento portland
NOM-C-30-1977	Muestreo de agregados
NOM-C-56-1978	Determinación de la finura de los cementantes hidráulicos ( método de permeabilidad al aire ).
NOM-C-58-1967	Determinación del tiempo de fraguado en cementantes hidráulicos. ( Método de Gilmore )
NOM-C-59-1975	Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos. (método de Vicat)
NOM-C-83-1977	Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
NOM-C-85-1982	Método de prueba para mezclado mecánico de pastas y morteros de cementantes hidráulicos.
NOM-C-109-1977	Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.

- NOM-C-111-1982 Industria de la construcción. Concreto. -  
Agregados. Especificaciones.
- NOM-C-122-1982 Agua para concreto
- NOM-C-130-1968 Muestreo de cementantes hidráulicos
- NOM-C-131-1976 Determinación del análisis químico de cemen-  
tos hidráulicos.
- NOM-C-132-1970 Método de prueba para la determinación del-  
fraguado falso del cemento portland por el-  
método de pasta.
- NOM-C-156-1980 Industria de la construcción. Concreto fres-  
co. Determinación del revenimiento.
- NOM-C-157-1976 Determinación del contenido del aire del --  
concreto fresco por el método de presión.
- NOM-C-148-1981 Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de al-  
macenamiento para las pruebas de cementan-  
tes y concretos hidráulicos.
- NOM-C-151-1977 Determinación del calor de hidratación de -  
cementantes hidráulicos.

- NOM-C-152-1970 Método de prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-153-1971 Método de prueba para la determinación del sangrado en pasta de cemento y en mortero.
- NOM-C-159-1977 Elaboración y curado en el laboratorio de especificaciones de concreto.
- NOM-C-162-1976 Determinación del contenido de aire, peso unitario y rendimiento del concreto.
- NOM-C-164-1977 Determinación del peso específico y de la absorción del agregado grueso.
- NOM-C-165-1977 Determinación del peso específico y de la absorción del agregado fino.
- NOM-C-166-1983 Industria de la construcción. Agregados con contenido total de humedad por secado, método de prueba.
- NOM-C-177-1978 Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración.

NOM-C-191-1978

Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.

NOM-C-205-1979

Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.

ASTM-C-469-1975

Static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression.



## 8.- RECONOCIMIENTO

El reconocimiento de la tesis fue posible gracias a la beca otorgada por el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto ( IMCYC ) y al apoyo técnico y económico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en cuyas instalaciones se realizó la investigación bajo la dirección y supervisión de Enrique Erazo.

La autora agradece a Luis Esteva Maraboto, director del Instituto de Ingeniería, el haberle permitido el acceso a sus instalaciones, donde optimó su formación académica y ganó experiencia y conocimiento en el manejo y formó en que se comportan los materiales de construcción. Asimismo a Cutberto Díaz - Gómez, director del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, por haberme permitido formar parte de la institución que tan dignamente preside.

Se reconoce y agradece la participación de:

Roberto Meli y Carlos Javier Mendoza, subdirector y Coordinador, respectivamente, del Instituto de Ingeniería por la revisión y corrección del original de la tesis.

A Lena Ruiz, coordinadora de química inorgánica de la división de estudios de posgrado de la Facultad de Química, por su asesoría en el manejo de muestras y equipo para pruebas de

ultravioleta.

A Fernando Walls, director del Instituto de Química por el acceso a sus instalaciones y a René Villenas, técnico del mismo instituto por su asesoría en el manejo del analizador térmico, el espectrofotómetro de infrarrojo y equipo periférico como microprocesadores, pastilladora y microbalanzas.

A Mary Castellanos por su asesoría en el manejo de muestras y equipo de rayos-x de la división de estudios de posgrado de la Facultad de Química.

A Rufino Lozano, secretario técnico del Instituto de Geología y a Margarita Reyes por su apoyo y asesoría en el manejo de muestras y equipo para el estudio morfológico por microscopía electrónica el cual se realizó en sus instalaciones.

A Francisco Reyes y Cipriano Cruz, laboratoristas del Instituto y Facultad de Ingeniería, respectivamente, por su colaboración durante los ensayos de pastas y concretos.

A José Luis Martínez y Alberto Fuentes G., investigadores del Instituto de Ingeniería por su apoyo y muestras de camaraderismo durante la realización de ensayos y escritura de la tesis.

Tabla 1 Composición promedio de los cinco cementos hidráulicos tipo portland reconocidos por el ASTM

Tipo de cemento	Descripción General	Composición general en por ciento			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
I	Normal	49	25	12	8
II	Modificado	46	29	6	12
III	Resistencia rápida	56	15	12	8
IV	Bajo calor de hidratación	30	46	5	13
V	Resistencia a los sulfatos	43	36	4	12

Tomada de la Ref. 56

Tabla 2 Características de los cuatro compuestos principales del cemento tipo portland

Propiedades	Comportamiento relativo de cada compuesto			
	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Velocidad de reacción	medio	lento	rápido	lento
Calor liberado por unidad de compuesto	medio	bajo	alto	bajo
Valor cementante por unidad de compuesto :				
Temprana	bueno	pobre	bueno	pobre
Última	bueno	bueno	pobre	pobre

Tomada de la Ref. 56

Tabla 3

Contenido de aire necesario para proporcionar una distancia entre burbujas igual a 250 micras

Relación agua-cemento	Contenido de cemento en Kg/m <sup>3</sup>	Requisito de aire en porciento del volumen de concreto para una superficie específica de vacios dada				
		Superficie específica de vacios en mm <sup>2</sup>				
		14	18	20	24	31
0.35	445	8.5	6.4	5.0	3.4	1.8
	390	7.5	5.6	4.4	3.0	1.6
	330	6.4	4.8	3.8	2.5	1.3
0.49	445	10.2	7.6	6.0	4.0	2.1
	390	8.9	6.7	5.3	3.5	1.9
	330	7.6	5.7	4.5	3.0	1.6
	280	6.4	4.8	3.8	2.5	1.3
0.66	445	12.4	9.4	7.4	5.0	2.6
	390	10.9	8.2	6.4	4.3	2.3
	330	9.3	7.0	5.5	3.7	1.9
	280	7.8	5.8	4.6	3.1	1.6
	225	6.2	4.7	3.7	2.5	1.3

Tomada de Cc. Ref. 40

Tabla 4

Propiedades del concreto con aditivo superfluidificante empleados como reductores de agua de mezclado

Mezcla	Tipo de concreto	Contenido de agua	Relación A/C	Aire incluido	Rev.** en cms.	Peso volu métrico Kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión en Kg/cm <sup>2</sup>		Módulo -- elástico en Kg/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>-4</sup>	
							Edad en días			
							7	28	90	28
	Cemento tipo I									
AI	Mezcla testigo	147	0.49	5.2	7.5	2348	268	328	378	32
2	Tipo A	120	0.40	6.0	7.0	2350	355	393	476	37
3	Aditivo Tipo B	120	0.40	5.6	8.0	2362	373	440	485	37
4	Tipo C	120	0.40	5.6	8.0	2360	363	426	499	36
	Cemento tipo V									
B5	Mezcla testigo	144	0.48	5.4	9.0	2352	191	322	380	32
	Tipo A	118	0.38	5.3	8.0	2381	330	420	485	35
	Aditivo Tipo B	117	0.38	5.4	7.5	2364	319	403	462	36
	Tipo C	118	0.38	5.2	8.5	2379	328	424	503	35

Nota : Agregado grueso caliza triturada, de tamaño máximo 19 mm natural. Módulo elástico a 28 días tomada de la Ref. 2

TABLA 5

Incremento de la resistencia a compresión del concreto superfluidificado con relación agua-cemento constante .

Edad en días	Incremento de resistencia en porcentaje relativo a la mezcla de control		
	Concreto con aditivo tipo A	Concreto con Aditivo tipo B	Concreto con aditivo tipo C
7	28.60	33.80	5.40
28	10.90	18.10	6.50
183	13.70	28.00	7.60
365	15.80	13.70	5.40

A/C = 0.50

Rev. 10 ± 2 cm

Aire incluido 6 ± 2 por ciento

Medido antes de colar

Dosificación ( Kg/m <sup>3</sup> )				
Mezcla	Cemento	Agua	Grava	Areña
Testigo	393	196	882	813
con aditivo	290	145	872	982

\* Tomada de la Ref. 53

TABLA 6 Flujo plástico del concreto con y sin aditivo superfluidificante

Mezcla	Tipo de aditivo	Aditivo en ml/Kg de cemento		a/c	Flujo plástico medido en cilindros de 15x30 cm.				
		Superfluidificante	Incluidor de aire		f'c a 28 días en Kg/cm	f'c a 63 días en Kg/cm	Esfuerzo aplicado en Kg/cm	Relación - esfuerzo-deformación	Deformación total a 365 días
1	-	-	0.31	0.49	343	374	152	0.44	770
2	A	9.1	3.15	0.40	474	511	203	0.43	761
3	B	23.6	1.18	0.40	452	508	196	0.43	820
4	C	25.6	0.34	0.40	460	487	198	0.43	807

Tomada de la Ref. 12

El valor de la deformación total por flujo plástico se obtuvo después de restar la debida a contracción por secado y la deformación elástica en el momento de aplicar la carga.

Nota : El aditivo se utilizó como reductor de agua .

Tabla 7 Efecto de los aditivos superfluidificantes en la resistencia a congelación y deshielo del concreto con relación agua - cemento constante igual a 0.42

Mezcla	Tipo y dosis de aditivo en porcentaje	Rev.* en cm.	Porcentaje de aire	Sistema de vacíos			Factor de durabilidad	
				A	,cm <sup>1</sup>	L,	FD	FDR
1	Control sin aire incluido	4.5	2.1	-	-	-	-	-
2	Control con aire incluido	4.5	4.8	4.9	340	150	100	-
3	Tipo A 0.5	9.0	5.0	4.4	243	200		100
4	1.0	26.0	4.8	4.1	226	230		100
5	1.5	26.0	3.4	2.8	308	200		100
6	Tipo B 1.0	10.0	5.2	5.8	246	180		100
7	2.0	23.0	5.2	4.3	209	250		100
8	3.0	26.0	4.8	3.5	346	150		100
9	Tipo C 1.0	10.0	6.0	4.2	362	150		100
10	2.0	21.0	6.8	7.1	234	180		100
11	3.0	26.0	6.0	5.1	310	150		100

\* Revenimiento

Nota : El área del sistema de vacíos en porcentaje, cuenta de puntos según ASTM C 457, procedimiento B ASTM C 666, tomada de la Ref. 27 .



Tabla 8

Efecto de los aditivos superfluidificantes en la resistencia a congelación y deshielo del concreto con relación agua-cemento constante igual a 0.65

Mezcla	Tipo y dosis de aditivo en porcentaje	Rev.* en cm.	Porcentaje de aire	Sistema de vacíos			Factor de durabilidad	
				A	, cm <sup>1</sup>	L,	FD	FDR
1	Control sin aire incluido	5.0	2.8	2.2	55	127		-
2	Control con aire incluido	5.0	5.0	6.5	166	250	95.6	
3	Tipo A 0.5	10.0	3.9	4.8	143	330		103
4	1.0	21.0	3.4	3.0	141	410		102
5	1.5	25.0	2.6	3.3	166	330		93
6	Tipo B 0.1	9.0	4.5	5.2	173	250		103
7	2.0	21.0	3.5	4.9	128	360		101
8	3.0	25.0	3.5	3.6	125	430		103
9	Tipo C 1.0	8.0	5.8	5.6	137	310		104
10	2.0	20.0	4.8	4.8	166	280		104
11	3.0	25.0	4.6	5.0	150	310		104

\* Revenimiento

Nota : El área de sistema de vacíos en porcentaje, aumenta de puntos según ASTM C 157, procedimiento B ASTM C 666, tomada de la Ref. 39

TABLA 9

Efecto del aditivo superfluidificante sobre el sistema capilar de las pastas de cemento endurecidas .

PASTA	Volumen de poros capilares en $\text{cm}^3/\text{g}$			Porcentaje de poros	
	Volumen total	mayor de 1000 Å	menor de 1000 Å	mayor de 1000 Å	menor de 1000 Å
Testigo	0.0720	0.0433	0.0287	40	60
Fluidificante con melaminas	0.0860	0.0663	0.0197	23	77
Fluidificante con naftaleno	0.0870	0.0692	0.0178	20	80

Tomada de la Ref. 38

Nota : se uso cemento tipo I y relación agua - cemento igual a 0.28

TABLA 10

Propiedades físicas y químicas de los aditivos

Aditivo	Elemento en porcentaje			Densidad relativa	Porcentaje de				
	C	H	N		sólidos	cenizas	sodio	calcio	cloruros
A	45	3	1	1.130	25.9	7.6	0.01	0.019	0.045
B	20	3	21	1.125	19.0	6.1	2.40	0.021	0.020

(C) Carbono

(H) Hidrógeno

(N) Nitrógeno

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas del cemento tipo portland normal utilizado en el estudio experimental

Pruebas físicas	Pruebas químicas		Composición calculada		
	Oxidos	por ciento	Compuesto	por ciento	
Tiempo de fraguado (Vicat)					
Inicial en min.	140.00				
Final en min.	270.00				
Finura en por ciento					
Pasa malla 200	96.60				
Pasa malla 325	83.50				
Sup. específica Blaine en $\text{cm}^2/\text{g}$	3390.00				
Expansión en autoclave en por ciento	0.48				
Resistencia a compresión en $\text{Kg}/\text{cm}^2$					
a 3 días	182.00				
a 7 días	204.00				
a 28 días	302.00				
Consistencia normal					
por ciento de agua	24.30				
		Dióxido de sílice	19.90	Silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ )	45.9
		Trióxido de aluminio	6.10	Silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ )	22.4
		Oxido férrico	2.90	Aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ )	11.2
		Cal combinada	61.20	Ferroaluminato Tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ )	8.8
		Cal libre	0.80		
		Oxido de magnesio	1.60		
		Anhídrido sulfúrico	2.40		
		Oxido de sodio	0.47		
		Oxido de potasio	0.81		
		Alcalis totales	1.00		
		Residuo insoluble	1.00		
		Pérdida por ignición	2.70		

Tabla 12 Composición granulométrica y propiedades físicas del agregado grueso

Agregado Grueso				Densidad en $g/cm^3$	2.4
Abertura de malla en mm.	Peso en grs.	Porcientos			
		Individual	Acumulado	Absorción en por ciento	3.0
Retenido en 19.1	700	5.0	5.0	Peso volumétrico suelto en $Kg/m^3$	1400
12.7	4200	30.0	35.0		
9.5	4200	30.0	65.0	Peso volumétrico seco y compactado en $Kg/cm^3$	1650
4.8	4900	35.0	100.0		
SUMA	1400	100.0			

Tabla 13 Composición granulométrica y propiedades físicas del agregado fino

Agregado Fino				Densidad en $gr/cm^2$	2.35
Abertura de malla en mm.	Peso en grs.	Porcientos			
		Individual	Acumulado	Absorción en por ciento	5.0
Retenido en 2.38	4.40	8.0	8.0	Peso volumétrico suelto en $Kg/m^3$	1500
1.19	120.0	24.0	32.0		
0.59	130.0	26.0	58.0		
0.297	125.0	25.0	83.0		
0.149	75.0	15.0	98.0		
Polvos	10.0	2.0	--	Peso seco y compactado en $Kg/m^3$	1700
Suma	500	100.0	279		
Módulo de Finura			2.79		

**TABLA 14** Dosificación de los concretos con relación - agua - cemento a 0.35

Materiales	Dosificación en Kg/m <sup>3</sup>						
	M e z c l a						
	Testigo	1	2	3	4	5	6
Agua	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00
Cemento	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00	600.00
Grava	878.00	878.00	878.00	877.00	875.00	873.00	870.00
Arena	573.00	573.00	573.00	573.00	572.00	572.50	570.50
Finos	11.50	11.50	11.50	13.00	16.50	20.00	25.00
Aditivo *	0.00	1.50	3.00	4.50	6.00	9.00	12.00

**TABLA 15** Dosificación de los concretos con relación - agua - cemento a 0.45

Materiales	Dosificación en Kg/m <sup>3</sup>				
	M e z c l a				
	Testigo	1	2	3	4
Agua	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00
Cemento	467.00	467.00	467.00	467.00	467.00
Grava	924.00	923.00	921.00	918.00	913.00
Arena	603.00	602.00	601.00	599.00	596.00
Finos	12.00	14.00	17.00	22.00	30.00
Aditivo *	0.00	1.17	2.34	3.50	4.67

Nota : Se considera arena a las partículas mayores de malla no. 100 y finos a los menores .

\* El aditivo se dosificó en polvo

Tabla 16 Variación de las propiedades de los concretos fabricados con relación agua/cemento igual a 0.35 según el contenido y tipo de aditivo

Tipo de aditivo	Aditivo en por ciento (polvo)	Rev.* en cm.	Contenido de aire en por ciento	Propiedades mecánicas en Kg/cm <sup>2</sup>									Peso Volumétrico Kg/m <sup>3</sup>
				Edad en días									
				Compresión			Flexión			Módulo elástico x 10 <sup>3</sup>			
				7	28	90	7	28	90	7	28	90	
Ninguno	0.00	5.0	2.4	374.0	482.0	591.0	35.0	39.0	45.0	186.3	213.5	224.4	2189
A	0.25	10.1	2.3	419.0	537.0	608.0	40.0	46.0	49.0	184.2	209.2	226.0	2190
	0.50	20.0	2.3	443.0	560.0	627.0	41.0	45.0	51.0	201.2	207.5	222.8	2132
	0.75	>25.0	1.8	497.0	583.0	700.0	52.0	47.0	55.0	215.2	224.2	263.7	2295
	1.00	>25.0	1.8	425.0	489.0	587.0	--	40.0	59.0	209.9	218.6	238.2	2200
	1.50	>25.0	0.8	342.0	403.0	504.0	36.0	40.0	47.0	166.3	192.1	217.5	2240
	2.00	>25.0	0.8	280.0	336.0	420.0	25.0	32.0	35.0	150.2	182.6	--	2198
B	0.25	9.5	2.0	431.0	517.0	600.0	35.0	36.0	44.0	191.4	200.0	231.6	2200
	0.50	21.0	2.0	440.0	560.0	630.0	38.0	41.0	50.0	190.6	216.0	--	2198
	0.75	>25.0	1.6	502.0	570.0	690.0	38.0	47.0	55.0	231.2	230.0	263.4	2300
	1.00	>25.0	1.0	431.0	500.0	600.0	48.0	48.0	55.0	--	221.8	240.1	2200
	1.50	>25.0	0.7	375.0	416.0	523.0	36.0	41.0	52.0	171.2	184.0	200.0	2260
	2.00	>25.0	1.0	271.0	306.0	416.0	22.0	30.0	41.0	147.8	169.8	--	2200

Cemento/agregado = 0.41  
 Cemento = 600 Kg/m<sup>3</sup>  
 \* Revenimiento

Agregados  
 Grava 60 por ciento  
 Arena 40 por ciento

Tamaño máximo 19 mm  
 Módulo de finura de la arena = 2.8

Tabla 17

Tiempos de fraguado y pérdidas de revenimiento en función del tipo y dosis de aditivo de los concretos con relación agua - cemento igual a 0.35

Tipo y dosis de aditivo - en por ciento	Tiempo de fraguado en horas	Pérdida de revenimiento en cms.										
		Tiempo en minutos										
		00	15	30	45	60	75	90	105	120	135	
A	0.00	5.20	5.20	4.0	2.0	2.0	1.0	1.0	-	-	-	-
	0.25	6.40	10.0	6.0	4.0	3.5	3.0	2.0	1.5	1.0	-	-
	0.50	7.65	20.0	11.5	7.5	5.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0	-
	0.75	8.35	>25.0	20.0	9.0	7.0	6.0	5.0	4.0	2.0	2.0	1.0
	1.00	9.80	>25.0	>25.0	>25.0	18.0	9.5	6.5	3.0	3.0	2.0	2.0
	1.50	10.90	>25.0	>25.0	>25.0	25.0	20.0	10.5	6.0	4.5	3.0	3.0
	2.00	11.80	>25.0	>25.00	>25.00	>25.00	--	12.0	5.0	5.0	4.0	3.0
B	0.25	5.20	8.0	6.5	4.5	3.0	2.5	1.0	-	-	-	-
	0.50	6.00	14.0	14.0	9.0	5.0	3.0	2.0	1.0	-	-	-
	0.75	7.85	>25.0	18.0	10.0	6.0	5.0	5.0	3.5	2.0	1.0	-
	1.00	8.50	>25.0	>25.00	22.0	14.0	10.0	8.0	6.0	4.0	2.0	2.0
	1.50	9.75	>25.0	>25.0	>25.0	22.0	18.0	11.0	6.0	5.0	1.0	-
	2.00	10.56	>25.0	>25.0	>25.0	>25.0	20.0	9.0	7.0	5.5	5.5	2.0

Tabla 18 Resistencia al ataque por congelación y deshielo de los concretos con relación agua-cemento igual a 0.35

Tipo de aditivo	Porcentaje de aditivo	Número de ciclos		
		Edad en días		
		7	28	90
A	0.00	24	110	425
	0.25	35	175	440
	0.50	40	200	450
	0.75	35	180	430
	1.00	35	106	340
	1.50	30	100	330
	2.00	20	80	300
	2.50	13	55	215
B	0.25	40	210	450
	0.50	45	250	500
	0.75	45	200	500
	1.00	40	170	400
	1.50	30	150	340
	2.00	30	100	310
	2.50	18	60	290



Tabla 19 Variación de las propiedades de los concretos fabricados con relación agua - cemento igual a 0.45 según el contenido y tipo de aditivo.

Tipo de aditivo	Aditivo en por ciento (polvo)	Rev. * en cms.	Contenido de aire en por ciento	Propiedades mecánicas en Kg/cm <sup>2</sup>									Peso Volumétrico Kg/cm <sup>3</sup>
				Edad en días									
				Compresión			Flexión			Módulo Elástico x10 <sup>4</sup>			
				7	28	90	7	28	90	7	28	90	
Ninguno	0.00	6.0	2.7	285.0	377.0	478.0	31.0	37.4	40.0	120.0	141.0	167.0	2185
A	0.25	14.0	2.3	362.0	470.0	494.0	30.0	38.0	42.0	140.0	148.0	220.0	2192
	0.50	>25.0	1.5	396.0	475.0	545.0	40.0	38.0	41.0	142.0	155.0	232.0	2230
	0.75	>25.0	0.9	263.0	369.0	425.0	30.0	38.0	38.0	129.0	147.0	200.0	2250
	1.00	>25.0	0.9	185.0	300.0	371.0	30.0	38.0	40.0	115.0	138.0	187.0	2240
B	0.25	11.5	2.2	375.0	472.0	546.0	36.0	38.0	38.0	140.0	151.0	225.0	2200
	0.50	20.0	1.7	382.0	480.0	558.0	35.0	38.0	39.0	150.0	166.0	234.0	2220
	0.75	>25.0	1.2	274.0	369.0	449.0	30.0	36.0	41.0	132.0	144.0	198.0	2230
	1.00	25.0	0.9	200.0	303.0	364.0	31.0	36.0	39.0	120.0	138.0	182.0	2250

Cemento/agregado = 0.30  
 Cemento = 467 Kg/m<sup>3</sup>  
 \* Revenimiento

Agregados  
 Grava 60 por ciento  
 Arena 40 por ciento

Tamaño máximo 19 mm  
 Módulo de finura de la arena = 2.8

Tabla 20 Tiempos de fraguado y pérdidas de revenimiento en función del tipo y dosis de aditivo de los concretos con relación agua-cemento igual a 0.45

Tipo y dosis de aditivo en por ciento	Tiempo de fraguado en horas	Pérdida de revenimiento en cms									
		Tiempo en minutos									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
0.00	6.50	6.0	5.5	4.0	2.5	2.0	1.0	-	-	-	-
	7.20	14.0	8.0	5.5	4.0	3.0	3.0	2.0	1.0	-	-
	8.00	>25.0	20.0	12.5	5.0	4.0	2.5	2.0	1.0	-	-
	9.20	>25	>25.0	>25.0	>25.0	18.5	8.0	5.0	3.0	2.0	1.0
	11.00	>25.0	>25.0	>25.0	>25.0	20.5	16.0	9.5	5.0	4.0	3.0
0.25	7.00	11.5	6.0	4.5	3.0	2.0	1.0	-	-	-	-
	7.80	20.0	9.5	6.0	4.5	3.0	1.5	1.0	-	-	-
	9.00	>25.0	19.5	11.0	5.5	4.0	4.0	3.0	2.5	1.0	-
	10.60	25.0	25.0	21.0	9.5	5.5	5.0	4.0	3.0	2.0	2.0

Tabla 21 Resistencia al ataque por congelación y deshielo de los concretos con relación agua-cemento igual 0.45

Tipo de aditivo	Porcentaje de aditivo	Número de ciclos		
		Edad en días		
		7	28	90
A	0.00	15	50	300
	0.25	20	50	340
	0.50	15	50	280
	0.75	10	30	200
	1.00	-	20	200
B	0.25	15	60	375
	0.50	25	65	300
	0.75	10	45	250
	1.00	10	18	200

Tabla 22

Propiedades en función del porcentaje y tipo de aditivo de las pastas con relación agua - cemento igual a 0.27

Propiedad	Relación aditivo-cemento en porcentaje (polvo)												
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Tiempo de fraguado en horas Aditivo A	5.50	5.60	5.80	6.10	6.70	7.20	7.50	8.00	8.40	8.70	9.00	9.50	10.25
Aditivo B		5.40	5.50	6.00	6.50	6.90	7.30	7.80	8.25	8.85	9.30	9.45	9.90
Agua de cristalización en porcentaje Aditivo A	10.18	10.50	10.75	10.75	11.15	11.15	11.32	11.09	10.90	10.41	10.19	9.96	9.51
		10.68	11.00	11.06	11.30	11.50	11.31	10.86	10.45	9.52	9.10	8.78	8.56
Aditivo A 28 días	11.34	11.67	11.98	12.16	12.39	12.61	12.67	12.29	12.28	11.99	11.65	10.98	10.47
		11.72	12.28	12.41	12.69	13.00	12.81	11.56	10.84	10.37	9.93	9.93	9.68
Calcio libre en porcentaje Aditivo A	5.78	6.00	5.41	5.72	6.01	6.24	5.52	5.18	5.02	4.87	4.82	4.74	4.77
		6.00	6.00	6.43	6.50	6.50	6.39	6.00	6.00	5.83	5.62	5.20	5.00
Aditivo A 28 días	10.57	9.55	9.20	9.45	9.70	10.10	9.76	9.33	8.94	8.60	8.00	8.20	8.00
		10.10	10.30	10.58	10.83	10.92	10.65	10.35	10.00	9.81	9.62	9.50	9.10
Resistencia a compresión en Kg/cm <sup>2</sup> Aditivo A 7 días	532	609	655	675	698	725	715	650	580	525	485	460	446
		627	663	678	714	723	717	677	613	540	504	481	446
Aditivo A 28 días	660	702	756	787	815	851	837	800	745	672	615	580	556
		721	765	793	800	839	810	769	700	619	587	551	518

Tabla 23

Propiedades en función del porcentaje y tipo de aditivo de las pastas con relación agua - cemento igual a 0.35

Propiedad	Relación aditivo-cemento en porcentaje (polvo)							
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50
Tiempo de fraguado en horas								
Aditivo A	6.35	7.20	8.00	9.20	10.50	11.80	12.20	13.00
Aditivo B		6.50	7.70	8.65	9.80	10.30	10.90	12.50
Agua de cristalización en porcentaje								
Aditivo A 7 días	10.88	11.87	12.63	13.10	12.75	11.80	10.96	9.40
Aditivo B 7 días		12.16	12.84	13.28	12.83	11.90	9.51	8.00
Aditivo A 28 días	13.50	13.56	14.26	14.89	14.74	13.83	12.84	10.97
Aditivo B 28 días		14.00	14.51	15.00	14.65	13.26	11.80	10.00
Calcio libre en porcentaje								
Aditivo A 7 días	10.35	10.10	9.80	9.40	9.10	8.75	8.30	7.65
Aditivo B 7 días		10.40	10.60	10.60	10.30	9.92	9.50	9.15
Aditivo A 28 días	14.50	14.40	14.00	13.85	13.50	13.10	12.81	12.30
Aditivo B 28 días		14.70	15.00	15.00	15.25	14.75	14.00	13.55
Resistencia a la compresión en Kq/cm <sup>2</sup>								
Aditivo A 7 días	432	490	542	574	550	485	360	220
Aditivo B 7 días		510	550	580	540	493	351	230
Aditivo A 28 días	562	606	654	683	687	590	488	360
Aditivo B 28 días		635	671	690	680	585	469	348

TABLA 24

Influencia del porcentaje de aditivo tipo A en la velocidad de adquisición de resistencia de las pastas de cemento tipo portland con relación agua - cemento igual a 0.27 .

Aditivo - cemento en porcentaje (polvos)	Resistencia a la compresión en Kg/cm <sup>2</sup>						
	Edad en días						
	1	3	7	14	28	60	90
0.00	187*	413	532	640	660	700	780
0.25	250	470*	609	670	702	717	770
0.50	-	500	655	735	756	761	795
0.75	280	-	675	750	787	805	820
1.00	296	539	698	767	815	830	848
1.50	-	592	725	824	851	860	870
2.00	270	575	715	788	837	850	859
2.50	252	533	650	763	800	810	835
3.00	246	457	580	678	745	754	792
3.50	200	-	525	616	672	701	745
4.00	200	401	485	-	615	653	700
4.50	-	367	460	524	580	631	700
5.00	180*	351	446	525	556	620	693

\* Promedio de dos especímenes

**TABLA 25** Influencia del porcentaje de aditivo tipo A en la velocidad de adquisición de resistencia de las pastas de cemento tipo portland con relación agua-cemento igual a 0.35

Aditivo/cemento en porcentaje (polvos)	Resistencia a la compresión en Kg/cm <sup>2</sup>						
	Edad en días						
	1	3	7	14	28	60	90
0.00	152	339	432	510	562	636	705
0.25	227	382	490	566	606	671	730
0.50	251	427	542	604	654	714	765
0.75	275	490	574	631	683	733	787
1.00	243	416	550	585	687	705	758
1.50	101	247	485	530	590	603	680
2.00	56	130	360	316	488	561	565
2.50	45	108	220	300	360	429	504

TABLA 26

Influencia del porcentaje de aditivo tipo A sobre la resistencia a compresión de pastas con diferente relación agua - cemento y curado estándar de 7 y 28 días

Agua/cemento	Resistencia a compresión en Kg/cm <sup>2</sup>											
	0.25		0.27		0.30		0.35		0.40		0.45	
Edad en días	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28
Aditivo/cemento en porciento												
0.00	590	715	532	660	483	615	432	562	405	519	384	485
0.25	655	750	609	702	546	645	490	606	487	526	442	528
0.50	713	819	655	756	590	689	542	654	534	622	376	507
0.75	767	835	675	787	613	727	574	683	417	580	279	390
1.00	774	890	698	815	621	771	550	687	321	459	182	275
1.50	808	920	725	851	575	760	435	590	196	308	-	-
2.00	802	940	715	837	500	680	360	488	-	-	-	-
2.50	743	919	650	800	460	590	220	360	-	-	-	-
3.00	667	885	580	745	390	540	-	-	-	-	-	-
3.50	612	840	525	672	340	470	-	-	-	-	-	-
4.00	561	765	485	615	295	421	-	-	-	-	-	-
4.50	523	738	460	580	236	376	-	-	-	-	-	-
5.00	470	667	446	556	220	300	-	-	-	-	-	-





Figura 1 Se muestra una micrografía de una sección pulida y atacada con agua del clinker de cemento tipo portland. Se observan cristales grandes y angulares de  $C_3S$ , ligeramente a la izquierda del centro de la micrografía se observan dos cristales, pequeños, de periclase ( $MgO$ ), el material brillante en los intersticios corresponde al  $C_4AF$

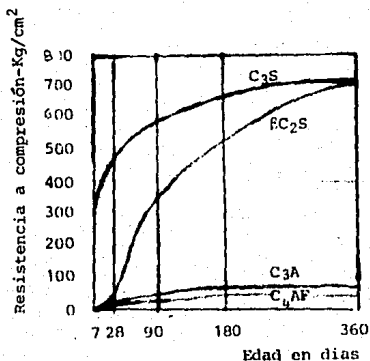


Figura 2 Adquisición de resistencia de compuestos puros del cemento

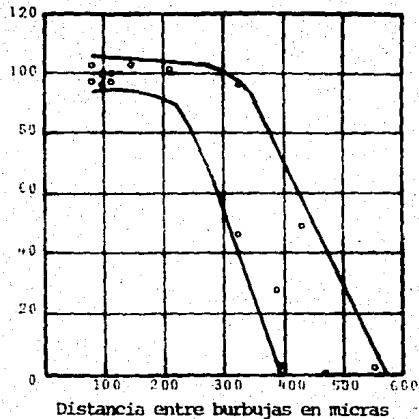


Figura 3 Relación entre el factor de durabilidad y la distancia entre burbujas para un concreto con aditivo inclusor de aire. Tomada de la Ref. 40 pag. 419

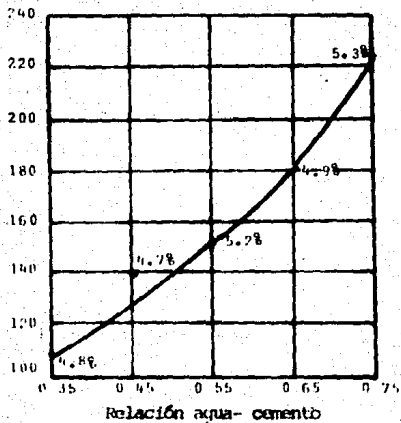


Figura 4 Influencia de la relación agua-cemento en el espaciamiento de vacíos en el concreto con un contenido de aire promedio de 5 por ciento. Tomada de la Ref. 40 pag. 420

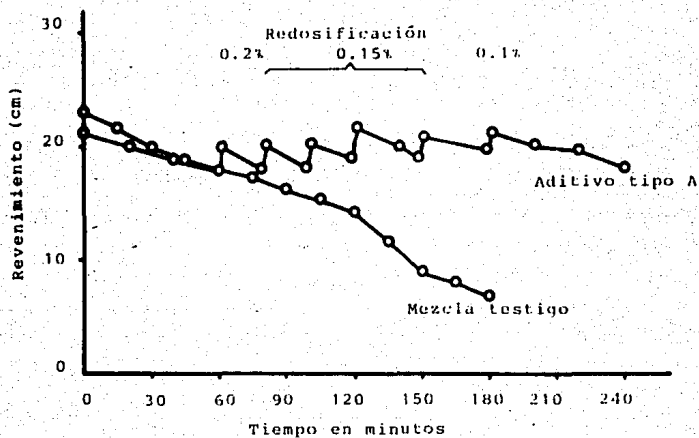


Figura 5 Redosificación del aditivo superfluidificante para controlar el revenimiento de mezclas de concreto a 10°C de temperatura ambiente. Tomada de la Ref. 16

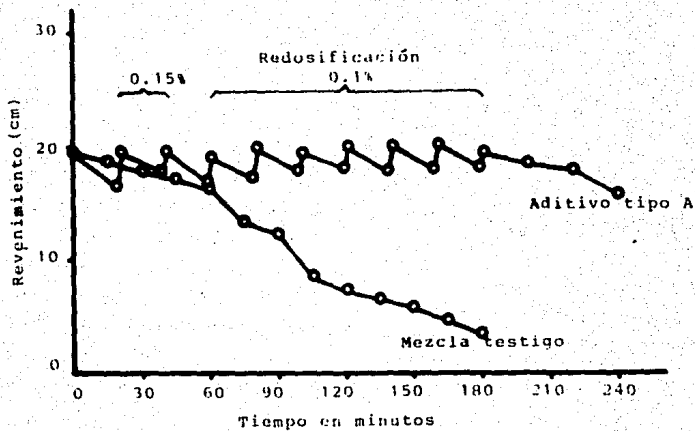


Figura 6 Redosificación del aditivo superfluidificante para controlar el revenimiento de mezclas de concreto a 20°C de temperatura ambiente. Tomada de la Ref. 16

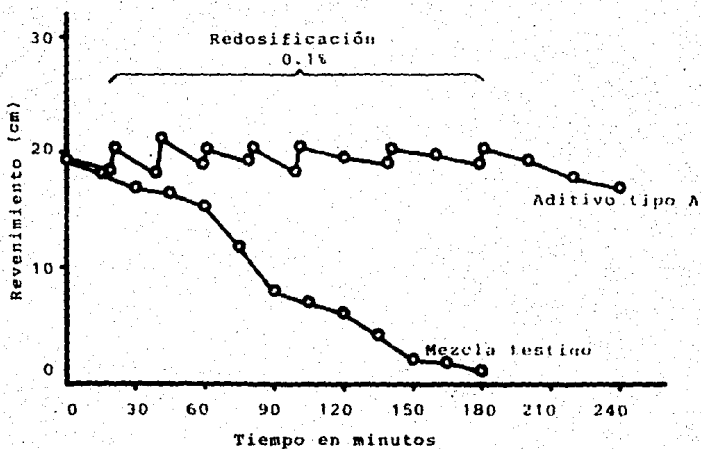


Figura 7. Redosificación del aditivo superfluidificante para controlar el revenimiento de masclas de concreto a 30°C de temperatura ambiente. Tomada de la Ref. 16

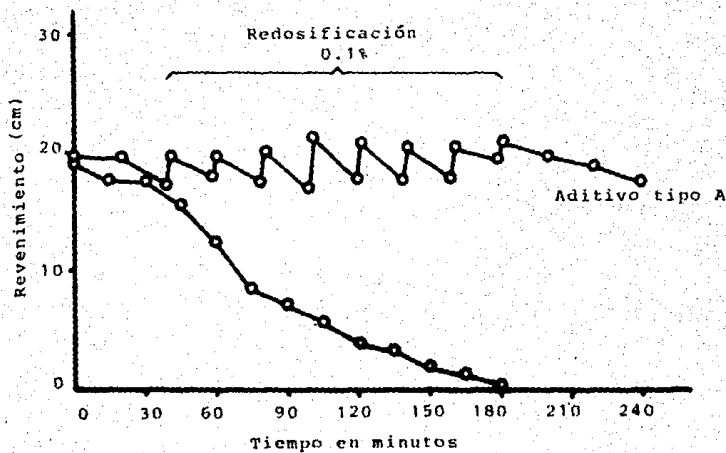


Figura 8 Redosificación del aditivo superfluidificante para controlar el revenimiento de masas de concreto a 35°C de temperatura ambiente. Tomada de la Ref. 16

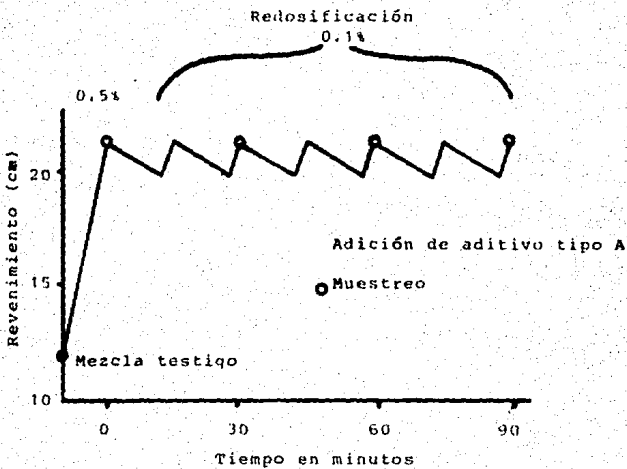


Figura 9 Redosificación del aditivo superfluidificante para controlar el revenimiento a 21 cm. en mezclas de concreto. Tomada de la Ref.

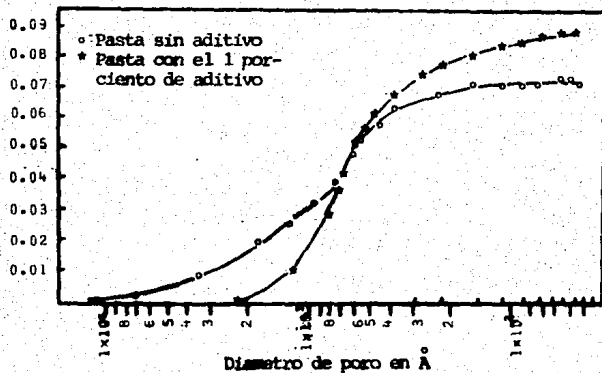


Figura 10 Gráfica porométrica de las pastas de cemento, con relación agua cemento igual a 0.28, Tomada de la Ref. 38



Aditivo tipo A

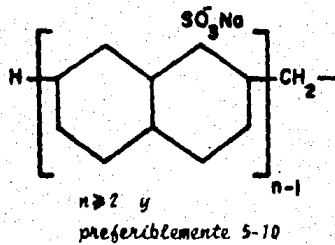


Fig 11 Condensado de Naftalen formaldehido sulfonato de sodio

Aditivo tipo B

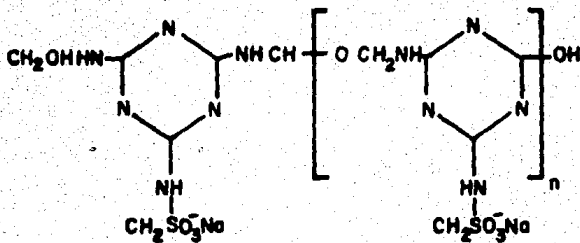


Fig 12 Melamina formaldehido sulfonato de sodio



Figura 13 Revolvedora utilizada para la elaboración de los especímenes de concreto.



Figura 14 Determinación del tiempo de fraguado de una mezcla de concreto por medio del penetrómetro.



Figura 15 Determinación del peso volumétrico de la mezcla de concreto

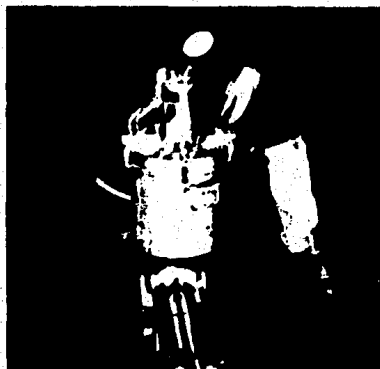
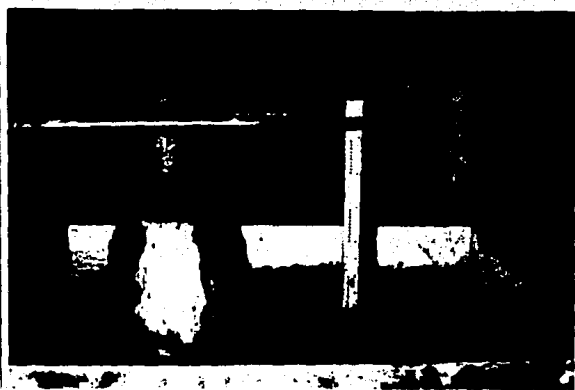


Figura 16 Determinación del contenido de aire



T<sub>0</sub>



T<sub>15</sub>



T45

Figuras 17 y 18 Determinación y pérdida de revenimiento  
en función del tiempo.

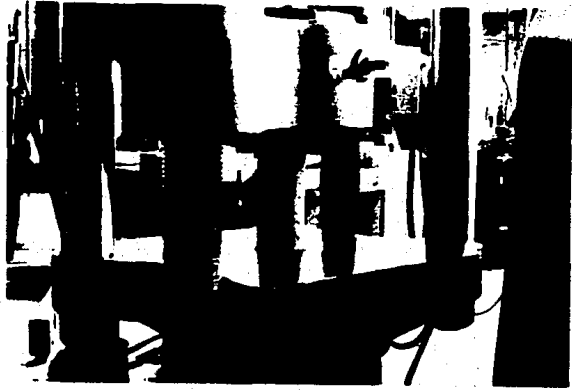


Figura 19 Ensayo a compresión de cilindros de concreto

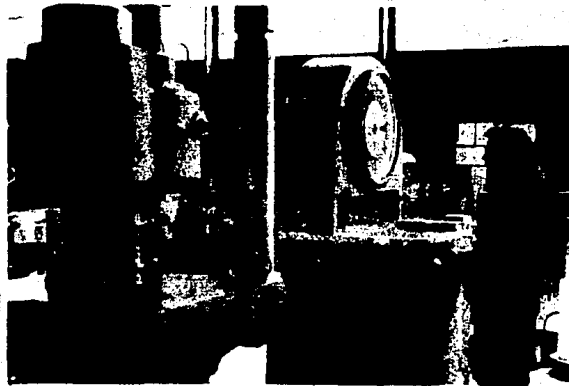


Figura 20 Determinación del módulo elástico de cilindros de concreto



Figura 21 Ensayo a flexión de vigas de concreto

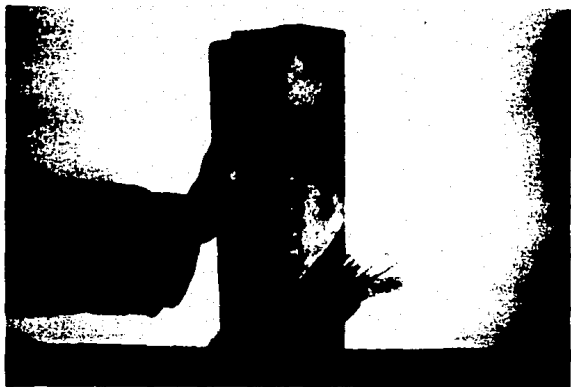


Figura 22 Muestra del espécimen protegido con un plástico termo-retráctil



Figura 23 Colocación del espécimen para ensayos de la resistencia a congelación y deshielo





Figura 24 Colocación de los especímenes en el equipo para pruebas a congelación y deshielo

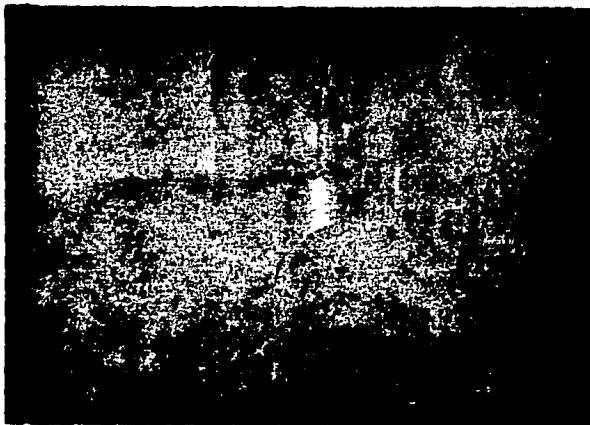


Figura 25 Procedimiento para la determinación de la fluidez por medio del cono de minirevenimiento

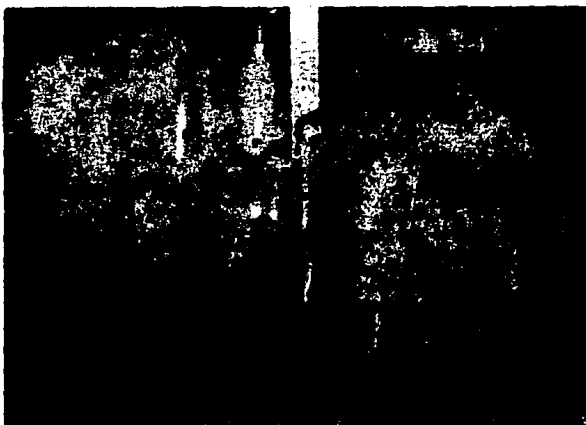


Figura 26 Determinación de la fluidez en base a la diferencia de alturas

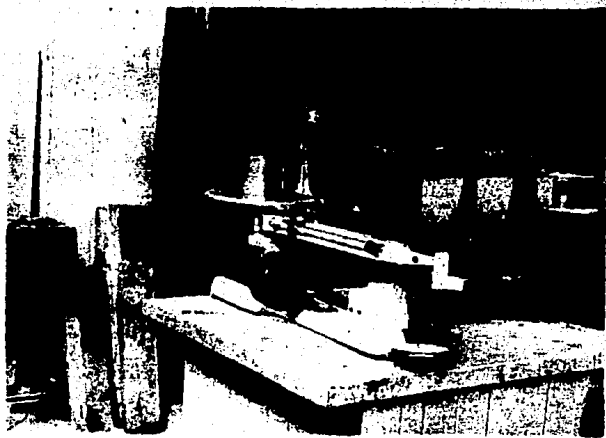


Figura 27 Determinación del peso volumétrico de la pasta de cemento.

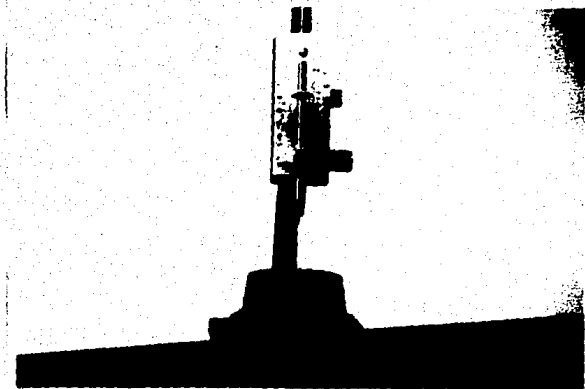


Figura 28 Determinación del tiempo de fraguado por medio de la aguja de Vicat

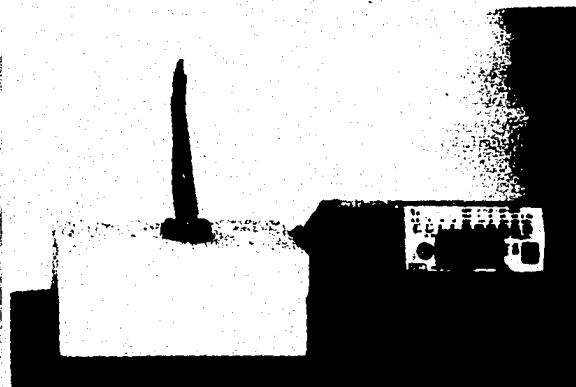


Figura 29 Medición de la temperatura de reacción



Figura 30 Determinación del calcio libre en muestras de pastas de cemento

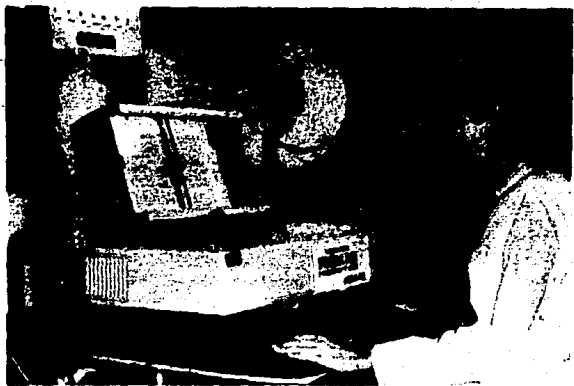


Figura 31 Análisis de ultravioleta

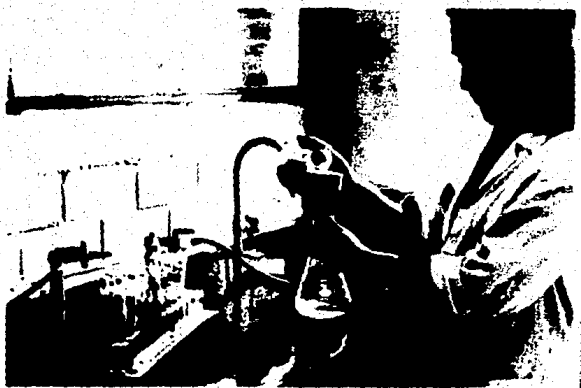


Figura 32 Filtrado de muestras de pasta de cemento para la elaboración de análisis de ultravioleta



Figura 33 Elaboración de pastas de cemento

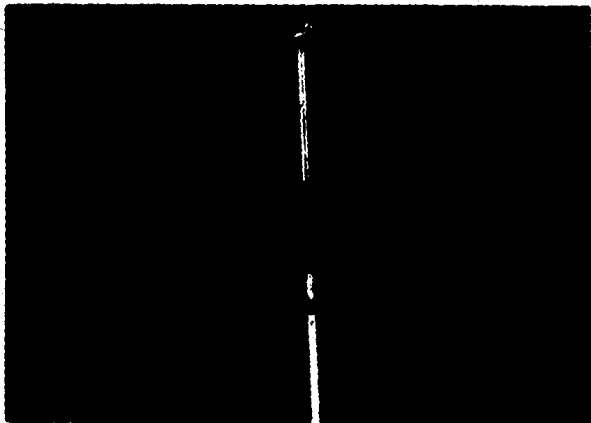


Figura 34 Especímenes de pasta de cemento

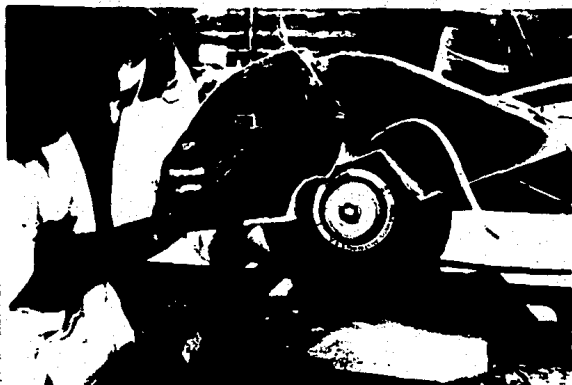


Figura 35 La fotografía muestra el corte de especímenes de pasta de concreto



Figura 36 Ensayo a compresión de los cilindros de pasta de cemento





Figura 37 Preparación de la muestra para el análisis de rayos X



Figura 38 Equipo utilizado para el análisis de rayos X



Figura 39 Fotografía del equipo para análisis térmico diferencial



Figura 40 Equipo para análisis de infrarrojo



Figura 41 Microscopio electrónico de barrido



Figura 42 Muestras para el análisis microscópico.

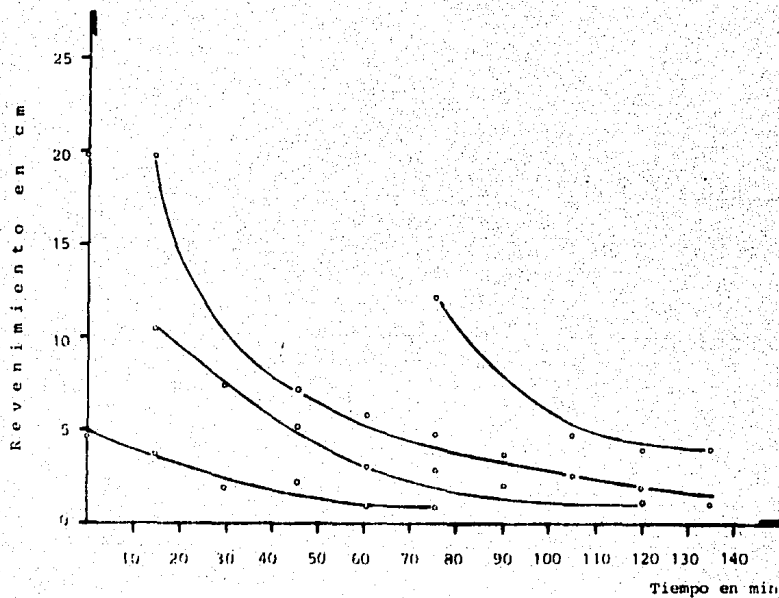


Figura 43 Gráfica comparativa de las pérdidas de revenimiento de los concretos con relación agua-cemento igual a 0.35 y aditivo tipo A en función del tiempo, medido a  $22 \pm 2$  de temperatura ambiente

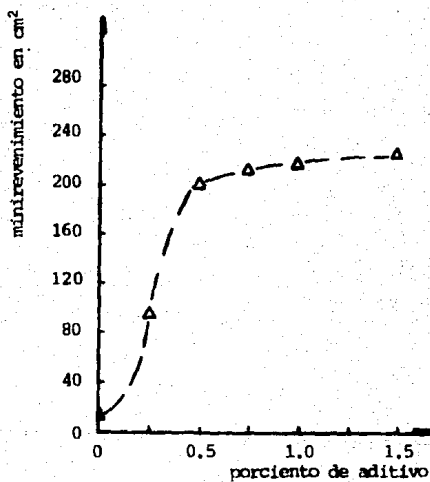


Figura 44 Influencia del porcentaje de aditivo tipo A sobre la fluidez de las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27, medida con el cono para minirevenimiento

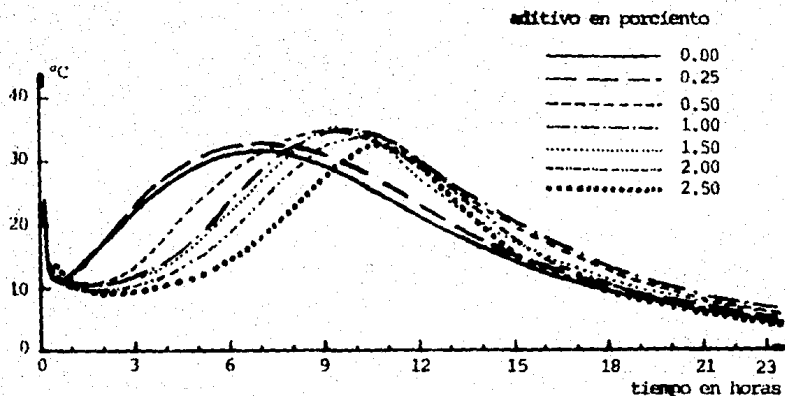


Figura 45 Velocidad con que se desarrolla calor en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27

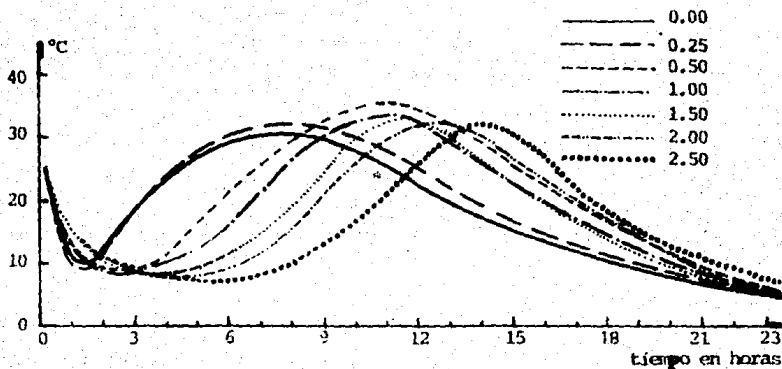


Figura 46 Velocidad con que se desarrolla calor en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.35

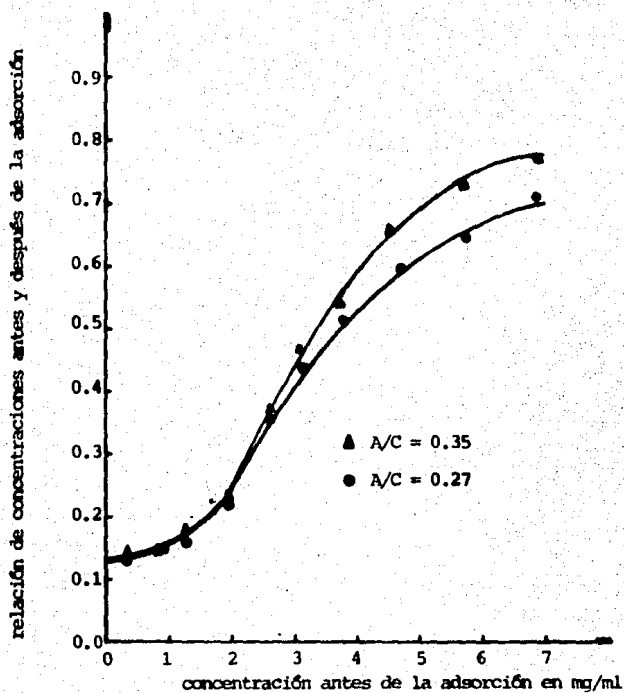


Figura 47 Porcentaje de aditivo adsorbido en la superficie de las partículas de cemento en función de la relación agua-cemento y el contenido de aditivo en la fase líquida

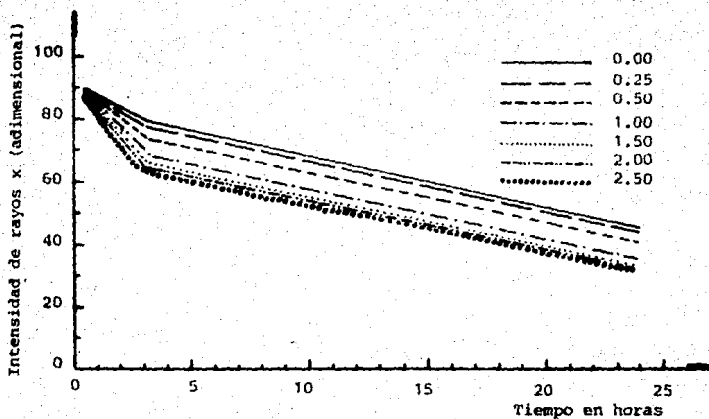


Figura 48 Velocidad de reacción de los silicatos de calcio en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27 y aditivo tipo A

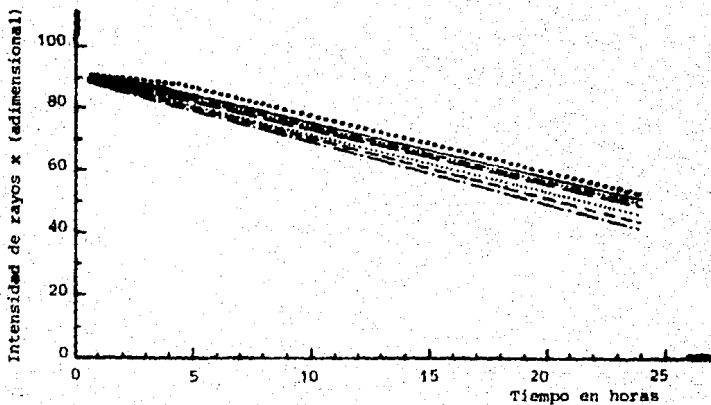


Figura 49 Velocidad de reacción de los silicatos de calcio en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.35 y aditivo tipo A



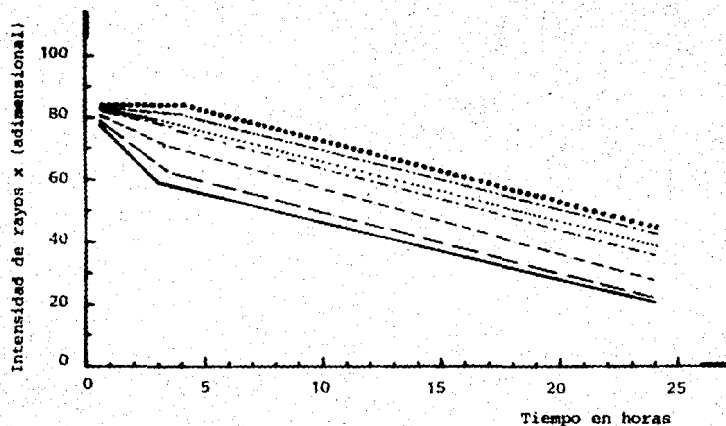


Figura 50 Velocidad de reacción del aluminato tricálcico en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.27 y aditivo tipo A

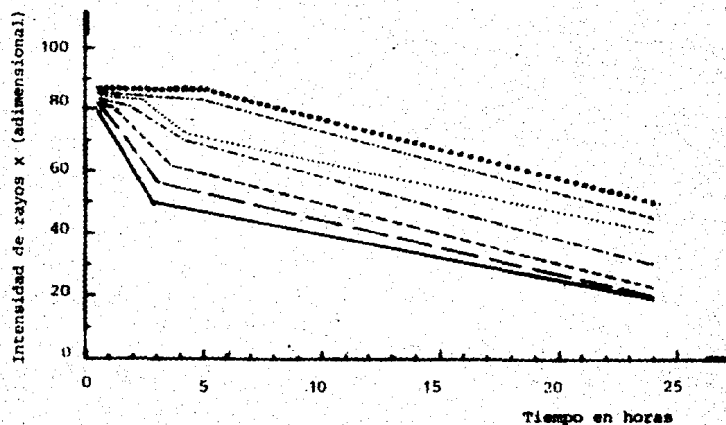


Figura 51 Velocidad de reacción del aluminato tricálcico en las pastas con relación agua-cemento igual a 0.35 y aditivo tipo A

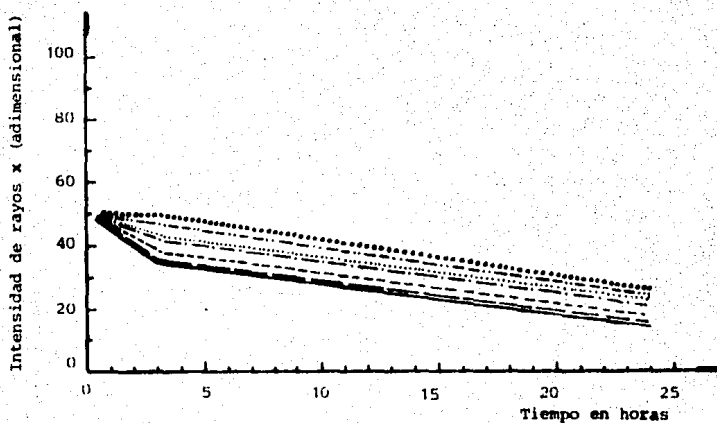


Figura 52 Velocidad de reacción del ferroaluminato tetracálcico en pastas con relación agua-cemento igual a 0.27 y aditivo tipo A

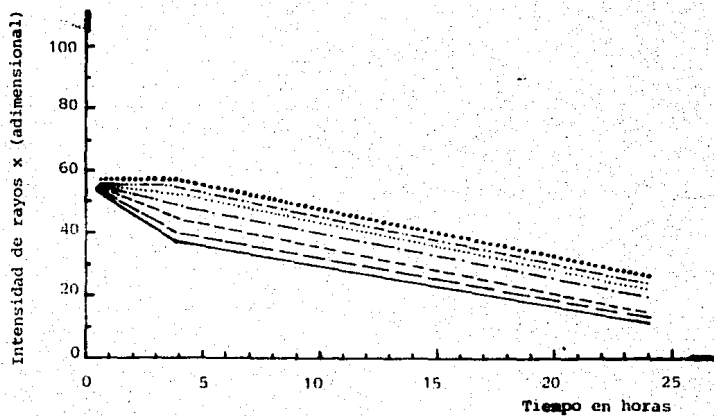


Figura 53 Velocidad de reacción del ferroaluminato tetracálcico en pastas con relación agua-cemento igual a 0.35 y aditivo tipo A

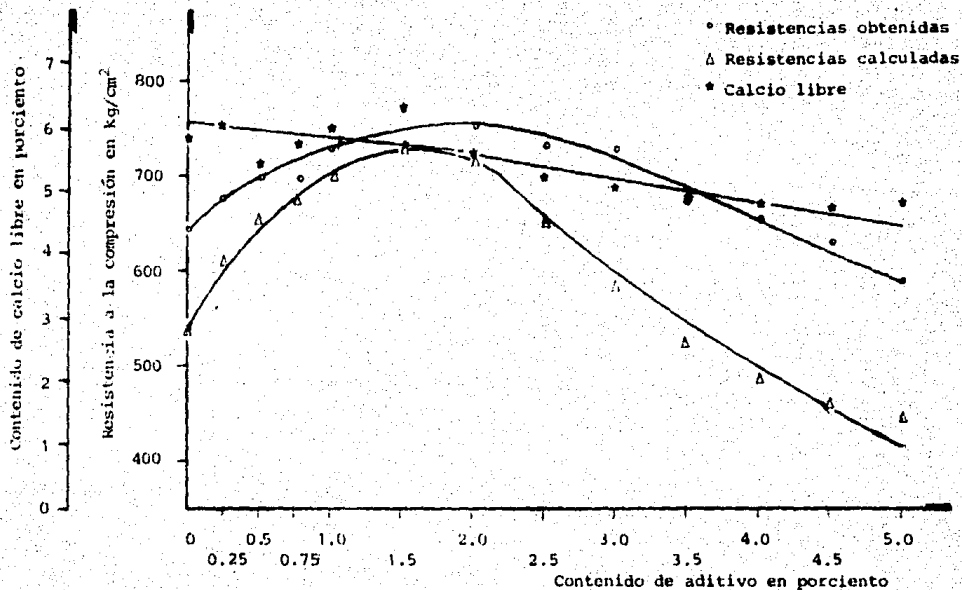


Figura 54 Gráfica comparativa de resistencias obtenidas y calculadas mediante el agua de cristalización y contenido de calcio libre de las pastas con aditivo tipo A y relación agua-cemento igual a 0.27 y 7 días de edad

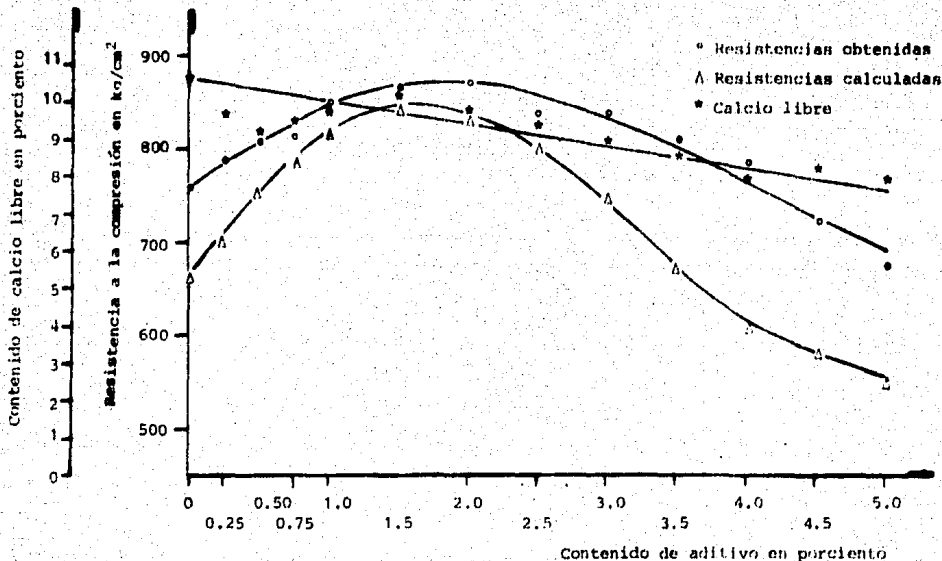


Figura 55 Gráfica comparativa de resistencias obtenidas y calculadas mediante el agua de cristalización y contenido de calcio libre de las pastas con aditivo tipo A y relación agua-cemento igual a 0.27 y 28 días de edad

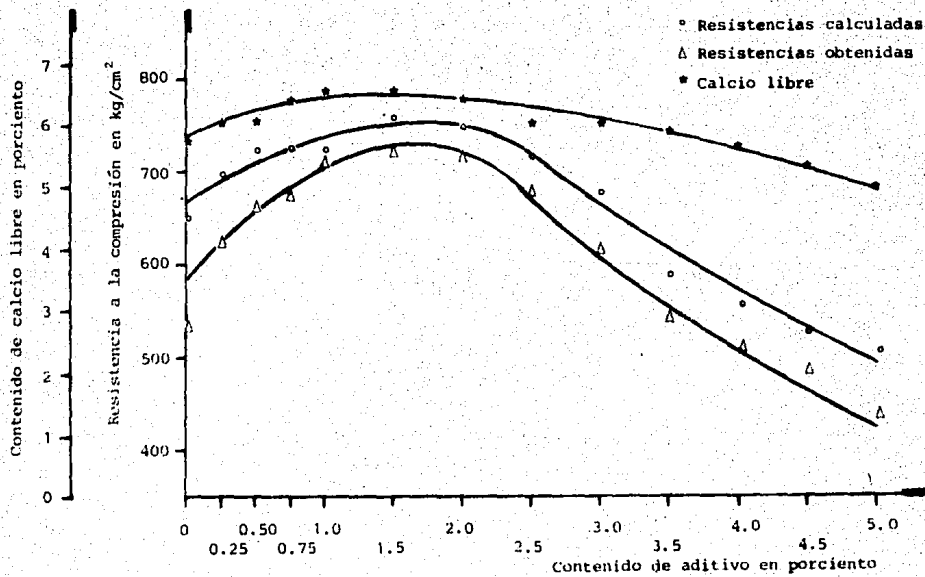


Figura 56 Gráfica comparativa de resistencias obtenidas y calculadas mediante el agua de cristalización y contenido de calcio libre de las pastas con aditivo tipo B y relación agua-cemento igual a 0.27 y 7 días de edad

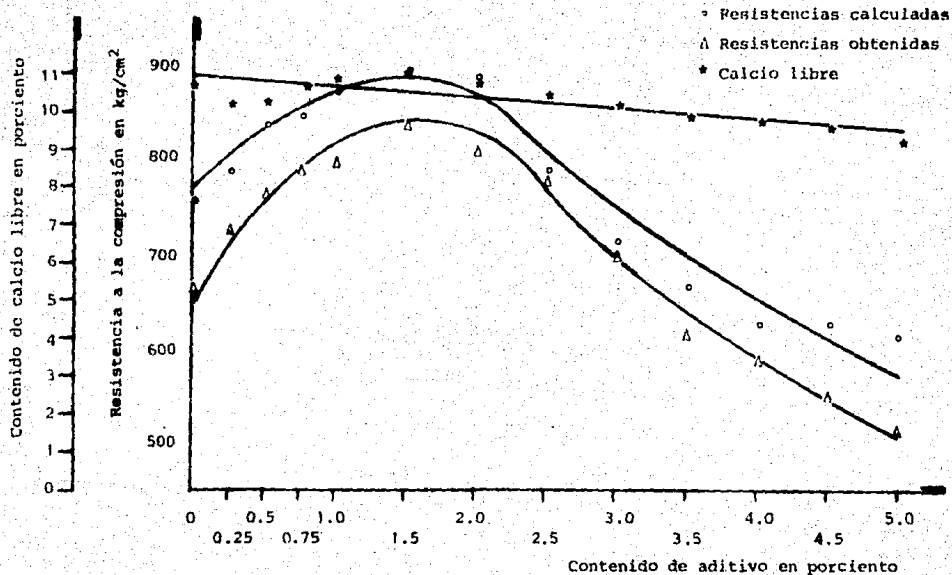


Figura 57. Gráfica comparativa de resistencias obtenidas y calculadas mediante el agua de cristalización y contenido de calcio libre de las pastas con aditivo tipo B y relación agua-cemento igual a 0.27 y 28 días de edad

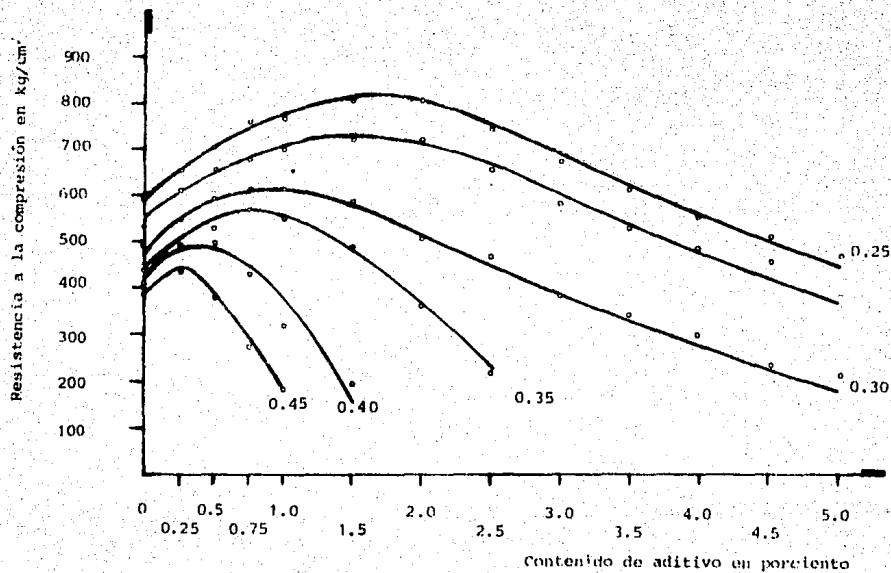


Figura 58 Gráfica comparativa del comportamiento a compresión de las pastas con aditivo tipo A en, función del porcentaje de aditivo y de la relación agua-cemento a 7 días de edad

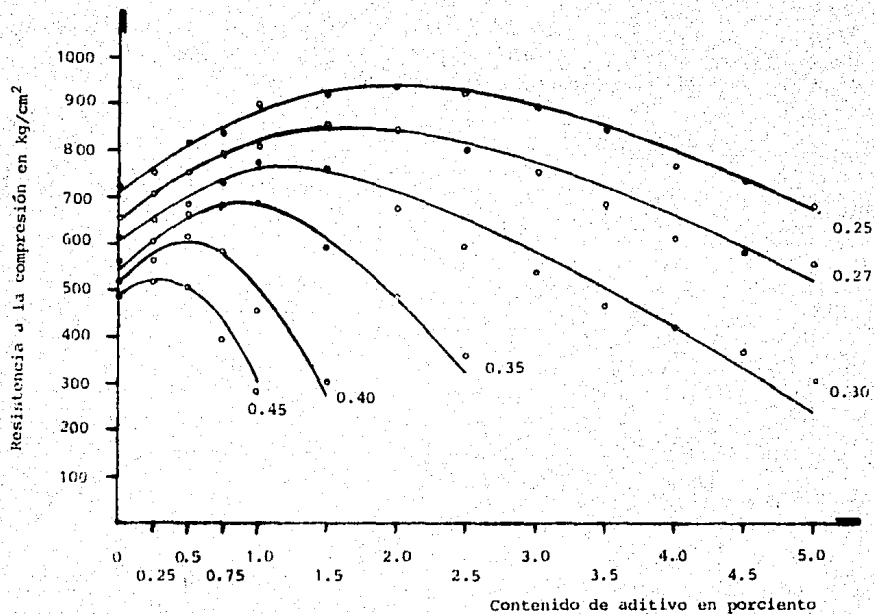


Figura 59 Gráfica comparativa del comportamiento a compresión de las pastas con aditivo tipo A en función del porcentaje de aditivo y de la relación agua-cemento a 28 días de edad



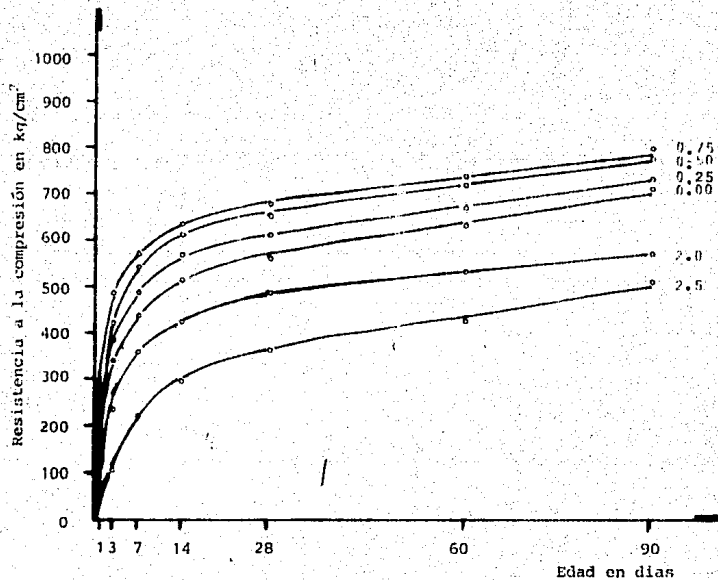


Figura 60 Gráfica comparativa del comportamiento a compresión de las pastas con aditivo tipo A, en función del porcentaje de aditivo y relación agua-cemento y a 7 días de edad

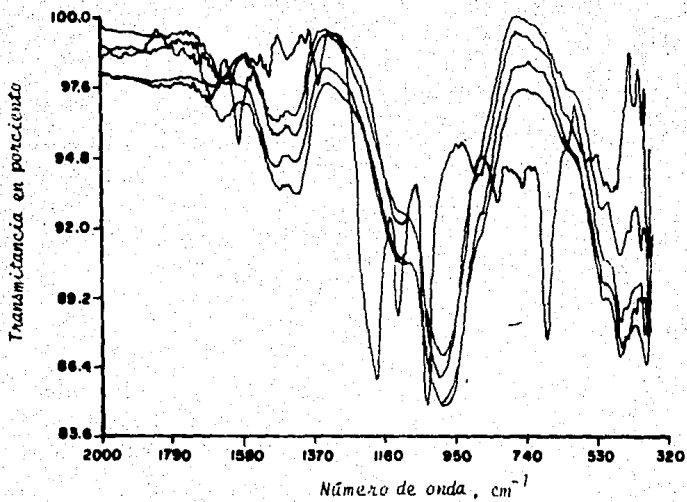


Fig 61 Influencia del 2 por ciento de aditivo tipo A sobre la respuesta al infrarrojo del cemento hidratado a 7 y 28 días

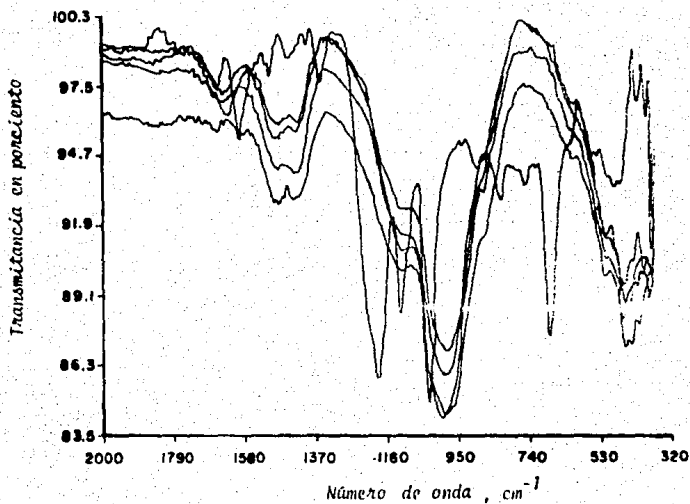


Fig 62 Influencia del 4 por ciento de aditivo tipo A sobre la respuesta al infrarrojo del cemento hidratado a 7 y 28 días.

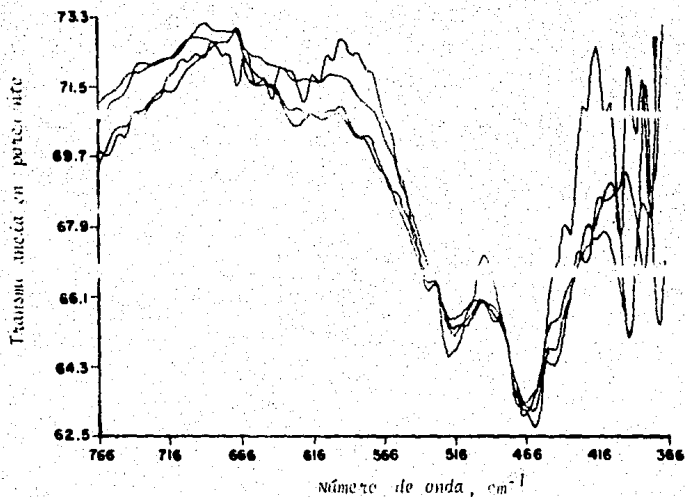


Fig 63 Influencia del 2 por ciento de aditivo tipo A sobre la respuesta al infrarrojo del cemento hidratado a 7 y 28 días (ampliación del espectro de la fig 61)

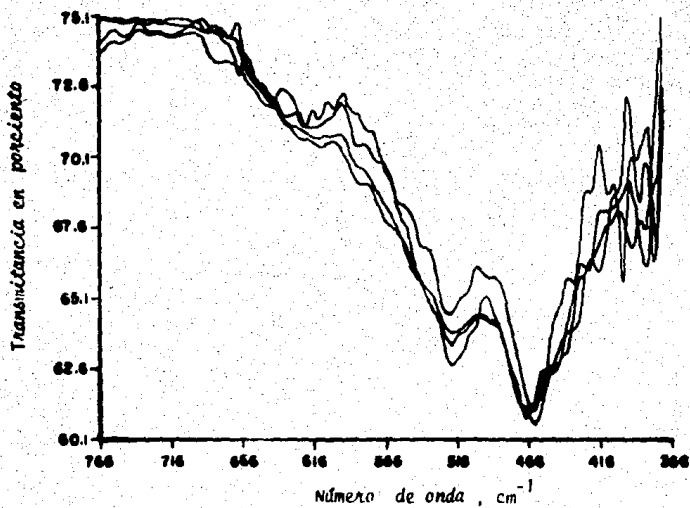


Fig 64 Influencia del 4 por ciento de aditivo tipo A sobre la respuesta al infrarrojo del cemento hidratado a 7 y 28 días (ampliación del espectro de la fig 62)

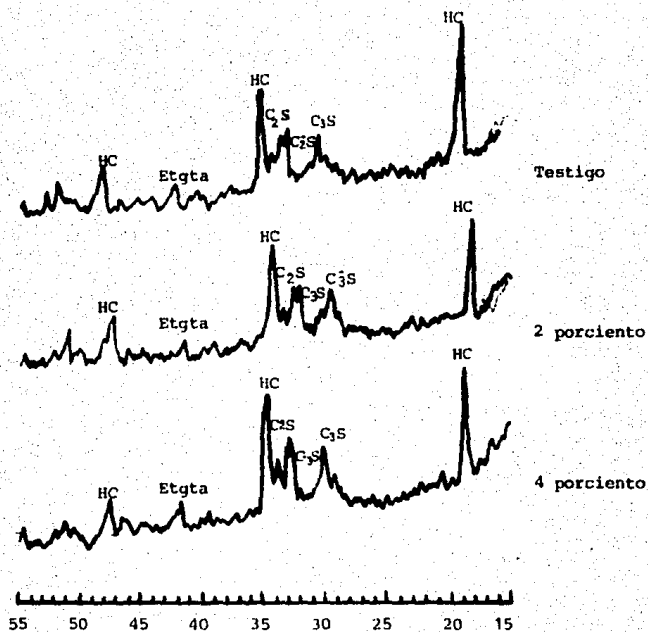


Figura 65 Influencia del porcentaje de aditivo tipo A sobre la hidratación de las pastas de cemento a 7 días de edad

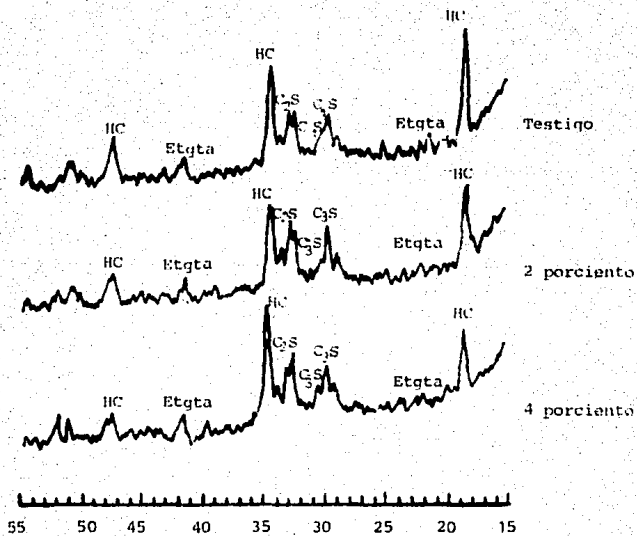


Figura 66 Influencia del porcentaje de aditivo tipo B sobre la hidratación de las pastas de cemento a 7 días de edad

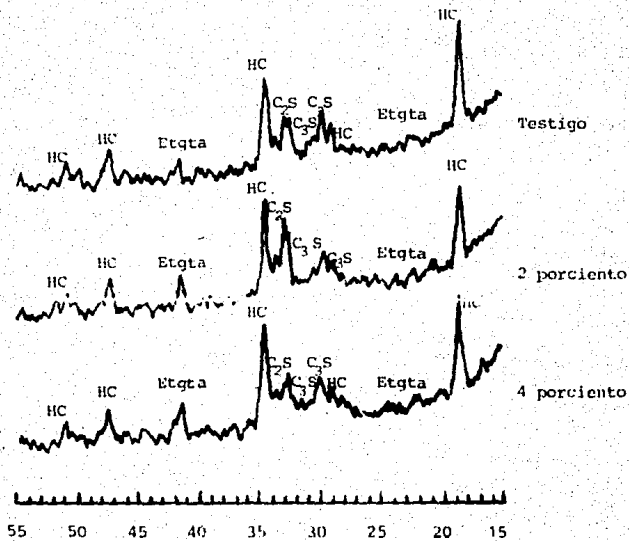


Figura 67 Influencia del porcentaje de aditivo tipo B sobre la hidratación de las pastas de cemento a 28 días de edad



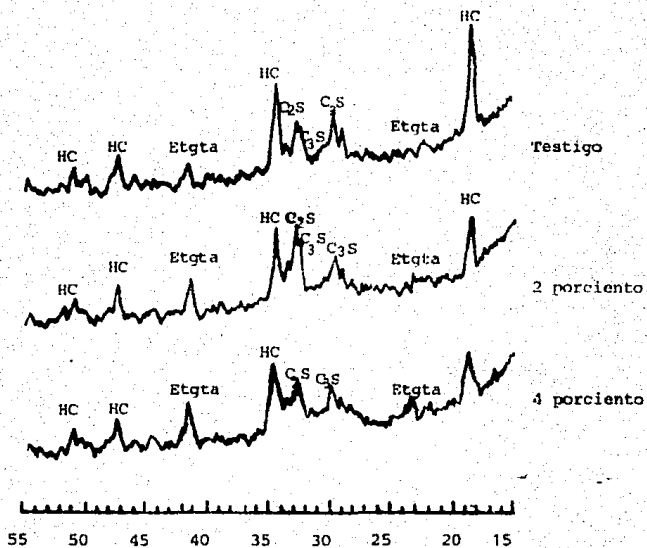


Figura 68 Influencia del porcentaje de aditivo A sobre la hidratación de las pastas de cemento a 28 días de edad



Figura 69 Pasta de cemento hidratada 6 horas, sin aditivo y 0.27 de relación agua-cemento, se observan granos de cemento cubiertos con productos de hidratación principalmente etringita



Figura 70 Pasta de cemento hidratada 6 horas, 0.75 de aditivo tipo A y 0.27 de relación agua-cemento, se observan granos de cemento, cristales de etringita y algunos de hidrosilicatos de calcio



Figura 71 Pasta de cemento hidratada durante 7 días sin aditivo y con relación agua-cemento igual a 0.27. Se observan poros mayores de 20 micras y cristales de tobermorita al centro



Figura 72 Pasta de cemento hidratada durante 7 días con relación agua-cemento igual a 0.27 y 0.75 por ciento de aditivo tipo A. Se observan poros del orden de 2 micras y gran cantidad de cristales atringitay en la parte superior una formación de tobermorita

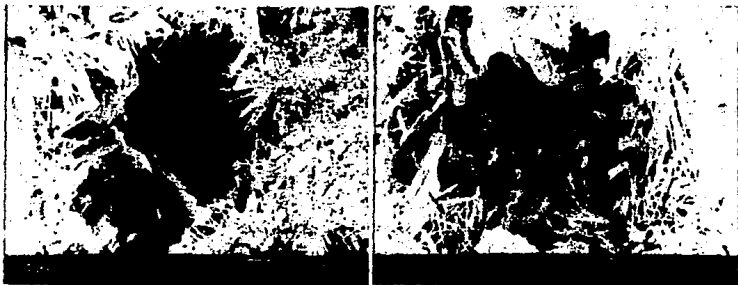


Figura 73 Micrografías de pasta de cemento hidratada durante 7 días con relación agua-cemento igual a 0.35 y 2.5 por ciento de aditivo tipo A. Se observa en (a) formaciones de etringita, algunos cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en poros de 50 micras, en (b) un acercamiento en donde se observa el fondo del poro.

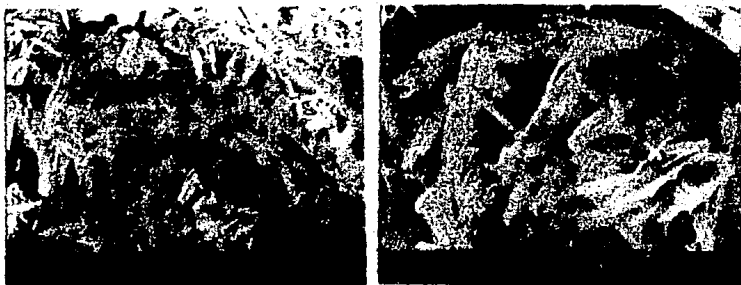


Figura 74 Se observan formaciones de sulfato de calcio, producto de la reacción entre aditivo tipo A y el hidróxido de calcio de una pasta hidratada durante 3 días, relación agua-cemento igual a 0.35 y 2.5 por ciento de aditivo. Se muestra en (b) un acercamiento de (a)



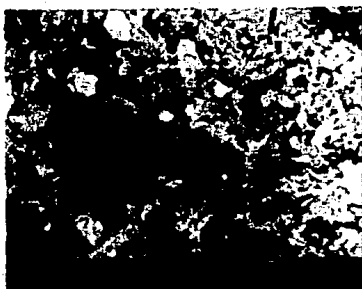
Figura 75 Micrografía de una pasta con relación agua-cemento 0.27, sin aditivo y 28 días de edad, se observan cristales de tobermorita grandes de espesor aproximado a 3 micras



Figura 76 Pasta de cemento hidratada durante 7 días, relación agua-cemento igual a 0.27 y 0.5 por ciento de aditivo tipo A, a diferencia de la anterior los cristales de tobermorita son de un espesor aproximado a 0.1 de micra, las formaciones se constituyen por varias placas



(a)



(c)



(b)

Figura 77 Micrografías de una pasta con relación agua-cemento igual a 0.35 y 0.5 por ciento de aditivo tipo A. Se observa que a 3 días se inicia la fragmentación capilar (a), a 7 días (b) la mayoría de los poros mayores de 20 micras se taponan y a 28 días (c) la microestructura es muy compacta

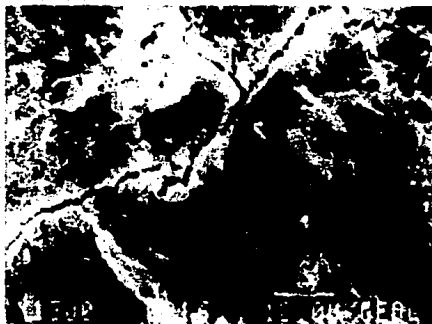


Figura 78 Se muestra agrietamiento severo en la micro estructura de pastas con relación agua-cemento igual a 0.35 y contenidos de aditivo tipo A superiores al 2 por ciento, hidratada durante 14 días

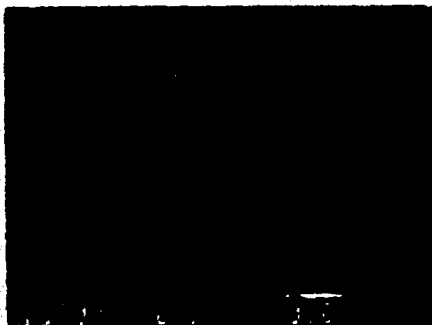


Figura 79 Se observa micro agrietamiento severo en pastas con relación agua-cemento igual a 0.45 y 2.5 por ciento de aditivo tipo A, cristales de etringita y de hidróxido de calcio, la edad de ensaye fue de 14 días

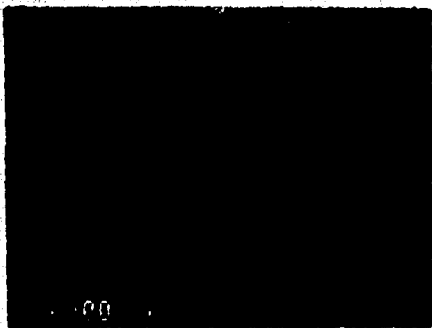


Figura 80 La micrografía muestra un acercamiento de la parte central de la micrografía 78, se observa en el fondo y paredes la presencia de etringita

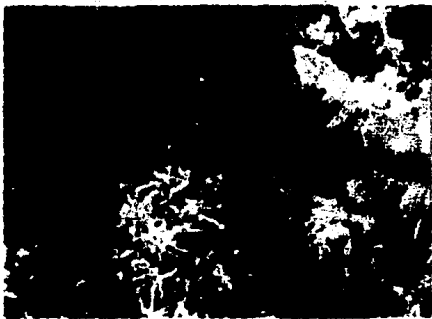


Figura 81 La micrografía muestra un acercamiento de la parte inferior derecha de la micrografía 79, se observan grandes formaciones de cristales de etringita



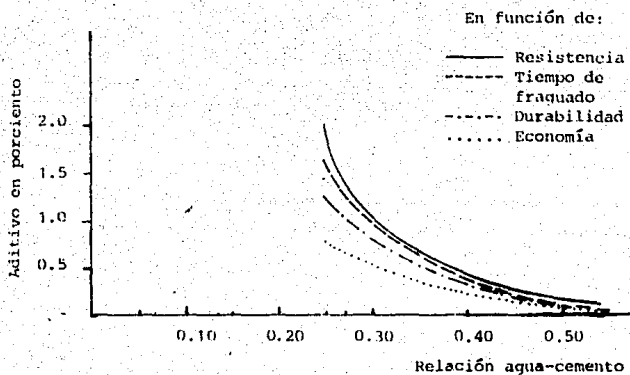


Figura 82 Porcentaje de aditivo óptimo, base seca, en función de la relación agua-cemento y resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía