

01146  
3



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**PROCESO DE OBTENCIÓN DE  
CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
**CONSTRUCCIÓN**  
P R E S E N T A E L:  
ING. JESÚS ANTONIO FLORES BUSTAMANTE

**ASESOR:  
MAESTRO JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES**

**MÉXICO, D.F.**

**MARZO DE 2002**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTO Y DEDICATORIA

Quiero agradecer a Francisco González Díaz, Leonel Estrada Loera y a Javier García Gallardo su participación en la elaboración de todas las mezclas de concreto que se realizaron para la elaboración de la presente Tesis, su ayuda, en forma personal, es invaluable. Cabe indicar que se realizaron en las instalaciones de los Laboratorios de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana Unida Azcapotzalco.

También tengo un especial agradecimiento a mi director de Tesis Maestro Juan Luis Cottier Caviedes por los consejos y paciencia recibida durante el desarrollo de los trabajos. De igual manera al Dr. Hugo Meza por los consejos que me dio en la elaboración final de la Tesis.

Por otra parte el apoyo que recibí de la Señorita Rosa María G. y de la Señora R. M. Kafferman que me alentaron moralmente en la elaboración y conclusión de todo el trabajo.

Este trabajo lo dedico con mucho cariño a: mi esposa Teresa a mis hijos Cynthia y Fabián Hazael. Y muy especialmente a mis nietas Andrea y María Fernanda.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# ÍNDICE

	PÁGINA
<b>INTRODUCCIÓN</b>	V
<b>CAPÍTULO 1. Antecedentes</b>	
1.1. Evolución Histórica	2
1.2. Consideraciones y Definiciones	6
<b>CAPÍTULO 2. Materiales</b>	
2.1. Introducción	15
2.2. Cementos	15
2.3. Agregados gruesos y finos	18
2.4. Aditivos químicos y minerales	21
2.5. Agua	24
<b>CAPÍTULO 3. Tecnología del concreto de alta resistencia</b>	
3.1. Diferentes procedimientos en la elaboración de concreto de alta resistencia	26
<b>CAPÍTULO 4. Mezclas de Prueba</b>	
4.1. Consideraciones previas	34
4.2. Programa	36
<b>CAPÍTULO 5. Mezclas de concreto de alta resistencia</b>	
5.1. Importancia de los aditivos minerales y químicos	40
5.2. Dosificaciones de concreto de Alta Resistencia	44
<b>CAPÍTULO 6. Resultados de los análisis de los materiales</b>	
6.1. Cementos	54
6.2. Agua	56
6.3. Arena	58
6.4. Grava	61
6.5. Aditivos	66
<b>CAPÍTULO 7. Desarrollo experimental</b>	
7.1. Recomendaciones y consideraciones previas a la elaboración de las mezclas del programa	69
7.2. Mezclas de pruebas preliminares	74
7.3. Dosificaciones de Concreto de Alta Resistencia	86
7.4. Experiencias actuales en la Ciudad de México	118

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	120
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	124
<b>APÉNDICE 1. Ejemplo de calculo de mezcla</b>	130
<b>APÉNDICE 2. Resultados de ensaye de probetas</b>	151

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Introducción

En México, la industria del cemento y concreto premezclado tiene un carácter conservador, los avances han sido lentos y raramente se logran registrar adelantos significativos que amplíen el horizonte de las posibilidades de las aplicaciones de las investigaciones efectuadas en el llamado primer mundo.

Un caso particular y buen ejemplo de la investigación aplicada es el aumento en la resistencia a compresión del concreto que, con el desarrollo de los aditivos químicos especialmente los plastificantes de alto rendimiento, también llamados reductores de agua o superfluidificantes, y con el empleo del humo de sílice o microsílíce como aditivo, han hecho posible elevar las resistencias permisibles a valores de 2.5 a 3 veces más altos, dando lugar a los llamados concretos de alta resistencia, con lo que las aplicaciones de este material en la industria de la construcción son de relevante importancia .

A principios de siglo era inimaginable el amplio mundo que ocuparía el concreto normal en la construcción, ahora con éste nuevo concreto el enigma suele ser igual, ya que no se puede limitar el uso del concreto de alta resistencia (CAR), éste sólo quedará limitado a la capacidad del ingeniero o arquitecto, sin soslayar a tantos artistas que han logrado rebasar las barreras del tiempo con las obras de arte realizadas en concreto simple, concreto reforzado o concreto preforzado.

Con el objetivo de tener una idea más clara y precisa del comportamiento de los concretos de alta resistencia se realiza la presente tesis mediante una investigación teórica – experimental que facilite la elaboración de las mezclas de este tipo de concretos.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Es importante señalar que el objetivo inicial del presente trabajo es lograr el procedimiento más adecuado para alcanzar resistencias al esfuerzo de compresión en mezclas de concreto del orden de  $800 \text{ kg/cm}^2$  (78.5 MPa), utilizando materiales disponibles en el área metropolitana de la Ciudad de México.

El parámetro que en principio se ha considerado obtener es la resistencia a la compresión, pero al mismo tiempo se hay que tener especial cuidado con la trabajabilidad de las mezclas.

Uno de los factores que intervendrá en forma directa, para obtener la resistencia que se ha fijado, es sin lugar a dudas la economía del concreto. Esta predicción no es difícil aseverarla, porque, sabemos de antemano que se requiere una buena calidad de los materiales, así como una rigurosa calidad de la elaboración de la mezcla y del equipo adecuado para su obtención.

Por otra parte es importante señalar que la elaboración del concreto se realizara en el laboratorio pero se tratará de utilizar el equipo que se emplea comúnmente en las obras, el objetivo es hacer accesible el procedimiento de mezclado y tratar de economizar el costo del concreto en este tipo de circunstancias.

Los alcances de este trabajo serán encontrar las mejores mezclas de concreto que logren obtener las más altas resistencias, teniendo en cuenta el procedimiento de mezclado, dado que algunos investigadores señalan que es importante la secuencia de cada uno de los elementos que conformarán el concreto final. Para ello se propone la siguiente:

**HIPÓTESIS.**- El concreto de alta resistencia a la compresión específicamente en su elaboración y una aceptable trabajabilidad, se puede obtener mediante una técnica particular de mezclado que dependerá de los materiales empleados.

Organización del trabajo:

En el Capítulo 1 se da una descripción breve de la evolución de la resistencia del concreto desde que se elaboraba con el cemento como material aglutinante hasta su combinación con aditivos químicos y aditivos finamente divididos. También se informa sobre algunas consideraciones y definiciones que otros investigadores han tenido en cuenta para la elaboración de los mismos.

El Capítulo 2 indica algunas particularidades del cemento, agregado grueso, agregado fino, aditivos químicos y aditivos finamente divididos que son los componentes que se emplearan para la obtención de los concretos de alta resistencia.

En el Capítulo 3 se ilustran principalmente algunos Métodos, Tecnologías y alternativas que se han considerado para la elaboración de este tipo de concretos.

En el Capítulo 4 se ve en forma general un planteamiento de los materiales disponibles en el mercado nacional para su posible empleo en la investigación y poder dar con ello un plan de la elaboración de mezclas de prueba.

El Capítulo 5 ilustra una serie de dosificaciones tipo, algunas definiciones y consideraciones de los materiales que se deben de tener en cuenta, en este caso, por ser semejantes a los que se emplearan en la elaboración del concreto de la presente tesis.

En el Capítulo 6 se encuentran los resultados de los análisis, hechos a los diferentes materiales disponibles, para poder elegir cuales pasarían a formar parte como componentes de las mezclas de concreto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El Capítulo 7 contempla en forma general recomendaciones y consideraciones que se tienen que tener en cuenta para la elaboración del concreto de alta resistencia sólo así, se estará en posibilidades de establecer o modificar la técnica a seguir de acuerdo con los objetivos de la investigación. Por otra parte se contemplan los resultados de los concretos elaborados de alta resistencia, desde la elaboración de morteros hasta la propia elaboración del concreto, indicando también algunos resultados paralelos necesarios, tomando en cuenta todas las referencias tenidas hasta el momento. También se muestra cuales son las experiencias actuales en la ciudad de México, en relación con la aplicación de los concretos de alta resistencia, para poder establecer algún tipo de vínculo ya sea directamente con la industria de la construcción o con las instituciones que estén realizando algún tipo de trabajo similar al que se pretende desarrollar en la presente tesis, con el objeto de lograr la mejor optimización de los recursos disponibles.

Por último se dan una serie de recomendaciones y conclusiones de los logros obtenidos y así poder continuar con los trabajos de esta tesis y con ello contribuir a una optimización de las investigaciones semejantes y paralelamente una mejora a los recursos empleados.

Finalmente se incluyen dos apéndices, el primero contiene un ejemplo de dosificación y resultados de los morteros, el segundo tablas de resultados obtenidos en los ensayos de probetas del concreto elaborado.

Para la elaboración de esta Tesis se tomaron como fuentes bibliográficas los trabajos, reportes de investigación y obras de renombrados investigadores o constructores, especialistas en el tema, así como diversas normas nacionales e internacionales.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPÍTULO 1. Antecedentes.

### 1.1. Evolución Histórica.

La evolución del material que en la actualidad conocemos con el nombre de concreto fue muy lenta en sus orígenes (1824, desarrollo y patente del cemento llamado Portland). Después de más de un siglo se planteó la posibilidad de utilizar nuevos componentes adicionales a los que inicialmente se conocían. Con la aparición de los primeros aditivos químicos en 1938, se pudo modificar a voluntad alguna de sus propiedades.<sup>1</sup>

El desarrollo y el uso del concreto de alta resistencia han sido todo un proceso evolucionista, los primeros trabajos estaban dirigidos a proporcionar altas resistencias tempranas en elementos presforzados, aun cuando las altas resistencias en las etapas posteriores no se requirieran<sup>2</sup>. El advenimiento del concreto presforzado en la construcción despertó el interés por el concreto de alta resistencia.

Hace apenas cuatro décadas era sorprendente la producción de concreto con resistencias a la compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup>, en la actualidad los especialistas en tecnología del concreto han centrado su atención en el desarrollo de métodos que puedan hacer viables la producción de concreto de rangos muy superiores (1500 kg/cm<sup>2</sup>), para ello es necesario conocer los factores que intervienen en la producción de concretos de alta resistencia.

Se han realizado diversas investigaciones sobre la resistencia del concreto, las cuales han arrojado que existe un incremento de resistencia en cuanto menor sea la relación agua/cemento así como mejoras en algunas de sus propiedades<sup>3</sup>. Sin

<sup>1</sup> Cfr. GONZÁLEZ-ISABEL, Germán, *Hormigón de Alta Resistencia* Grafman S.A, Gallarta (Vizcaya), s.f., pág 5

<sup>2</sup> Cfr. FIORATO Anthony E. "PCA Research on High Strength Concrete", *Concrete International: Design & Construction*, V. II No. 4 Apr, 1989, pág 44.

<sup>3</sup> Cfr. MACINNIS Cameron, T.HOMSON Donald V. "Special Techniques for Producing High Strength Concrete", *ACI Journal*, vol. 67, núm 12, december 1970, pág 996

embargo, fue en Japón en el año de 1950 cuando se realizaron ensayos con aditivos reductores de agua, permitiendo constatar las mejoras de las características del material, principalmente con relación a su resistencia, plasticidad y compacidad. A partir de esa fecha, el incremento de la resistencia del concreto es constante.

Es en la década de los 70's cuando se produce una serie de factores que fomentaron un desarrollo espectacular en la resistencia del concreto, y es cuando existe una evolución en la tecnología alcanzada por la industria del cemento. Se desarrolla en Japón y Alemania una nueva generación de aditivos químicos - agentes dispersantes de alto poder - basados en complejas moléculas orgánicas; su adición en el concreto permite una reducción de agua en la mezcla y, por consiguiente, un aumento de su resistencia. Estos aditivos reciben el nombre de superfluidificantes o reductores de agua de alto rango. Paralelamente se comienzan a utilizar los aditivos minerales finamente divididos, por ejemplo, en Canadá y los países nórdicos europeos, en esto se han estudiado las propiedades del humo de sílice o microsílíce.

La incorporación de mejores cementos, dichos superfluidificantes y las referidas adiciones minerales, posibilitó el desarrollo y la producción de una nueva generación de concretos cuyas características están siendo objeto de estudio y experimentación <sup>4</sup>.

Actualmente el empleo de estos llamados concretos de alta resistencia es relativamente común en algunos países industrializados (Japón, Canadá, Australia, Francia, Noruega y Estados Unidos) y su incorporación comenzó en la utilización en el concreto preforzado, al solicitarse resistencias a la compresión un poco mayores que las comunes  $200 - 250 \text{ kg/cm}^2$  ( $19.6 - 24.5 \text{ MPa}$ ), aproximadamente a  $400 \text{ kg/cm}^2$  ( $39.2 \text{ MPa}$ ). En nuestro país no es nada raro que proyectistas y constructores aún piensen en el concreto como un material con límites de resistencia del orden de los  $300 \text{ kg/cm}^2$  ( $29.4 \text{ MPa}$ ) quedando fuera de

---

<sup>4</sup> GONZÁLEZ-ISABEL, Germán., op. cit., pág.10

su concepción estructural el uso de concretos de alta resistencia.

Cuando se habla de concreto de alta resistencia es necesario indicar el rango de valores para los que el término debe aplicarse, pero antes de intentar acotar las resistencias para las cuales puede usarse esta acepción, es necesario describir el constante incremento de los valores en la resistencia a la compresión últimas décadas. En los años 50s, un concreto con resistencia a los esfuerzos de compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup> (34.3 MPa) era considerado de alta resistencia; hoy en día este valor es considerado como normal. En la siguiente década, valores de los esfuerzos de compresión de 400 a 500 kg/cm<sup>2</sup> (39.2 a 49.1 MPa) eran usados comercialmente en algunos sitios (principalmente en países del primer mundo), en los 70s se alcanzaban los 630 kg/cm<sup>2</sup> (62 MPa) y para los 80s ya se producían concretos de casi el doble de tales valores. La tabla 1.1.1. ilustra el desarrollo en el incremento a las resistencias a compresión en el área de Chicago, se eligió esta ciudad porque ahí es una región donde se encuentran una gran variedad de construcciones con concreto de alta resistencia, además es posible estudiar como se ha ido desarrollando el uso de la resistencia en los diferentes proyectos y a través del tiempo.

Año	Proyecto	f'c kg/cm <sup>2</sup>	f'c MPa
1962	Outer Drive East	420	41.2
1965	Lake Point Tower	525	51.5
1972	Mid Continental Plaza	630	62
1976	River Plaza <sup>5</sup>	630	62
1982	Chicago Mercantile Ex. <sup>6</sup>	630	62
1986	Columbia Center	675	66
1988	Two Union Square	990	97
1989	Construction Tech Labs	1200	117.7
1990	One Peachtree Center	850	83

Tabla 1.1.1.- Desarrollo en el incremento a las resistencias a compresión del concreto utilizado en el área de Chicago.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Dos columnas experimentales con resistencia de 775 kg/cm<sup>2</sup> (76 MPa).

<sup>6</sup> Dos columnas experimentales con resistencia de 990 kg/cm<sup>2</sup> (97 MPa).

<sup>7</sup> Elaboración propia en base a MORENO, J., "The State of the Art of High strength Concrete in Chicago", Congreso Internacional, Concreto 94 IMCYC, Acapulco, abril 1994. pág. 38. et al.

Entre otros ejemplos, podemos mencionar: los 30 pisos del Century Square 668 kg/cm<sup>2</sup> ( 65.5 MPa ), Bellevue Place 700 kg/cm<sup>2</sup> ( 69 MPa ), los 12 pisos de Firts & Stewart Building 775 kg/cm<sup>2</sup> ( 76 MPa ), Two Union Square Building 984 kg/cm<sup>2</sup> ( 96.5 MPa ) y 255 W. Wacker Drive 990 kg/cm<sup>2</sup> ( 97 MPa) todos ellos en la ciudad de Seattle. Se podrían citar más ejemplos en diferentes ciudades y países alrededor del mundo.

El incremento de la resistencia del concreto ha sido gradual y seguramente las investigaciones que se efectúen encontrarán concretos con resistencias superiores. Hoy en día se habla ya de concretos de muy alta resistencia y cuya clasificación se propone dividiéndola en cuatro clases diferentes (Aitcin), tabla 1.1.2., basándose en las resistencias promedio y en la facilidad con las que éstas se pueden alcanzar:

Estas clasificaciones no se definieron simplemente desde un punto de vista académico, ni porque corresponda a múltiplos exactos de 25 MPa, sino porque corresponden, por lo general, a barreras tecnológicas actuales.<sup>8</sup>

Pero sí debe reconocerse que no representan límites absolutos y seguramente se podrán encontrar excepciones.

Clase	f'c	
	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>
L	75 +/- 12.5	765 +/- 127
LI	100 +/- 12.5	1,020 +/- 127
LII	125 +/- 12.5	1,274 +/- 127
LV	Más de 150	Más de 1,529

Tabla 1.1.2. – Clasificación<sup>9</sup> de los concretos según Aitcin

Como se ha mencionado anteriormente, los concretos de alta resistencia se han podido elaborar desde los años sesenta; sin embargo, en la actualidad sólo en

<sup>8</sup> AITCIN, P, C, "Concretos de muy Alta Resistencia" . trad. Subdirección de Documentación y Proyectoteca de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Artículo del mes, México D.F., mayo. 1991. pág. 4.

<sup>9</sup> Elaboración propia en base a Ibid., pág. 3.

algunos lugares del mundo se han podido comercializar intensamente como: en el área de Chicago-Montreal-Toronto, en Seattle y en otros países como; Japón, Francia, Noruega y Alemania, en forma más aislada en el Sureste de Asia, Italia e Inglaterra. En estos lugares la integración de equipos de trabajo formados por diseñadores, constructores, empresas de concreto premezclado y laboratorios especializados han permitido que se utilice más este material de gran comportamiento, alcanzando cada vez mayores valores en su resistencia. Por otra parte, se han construido edificios con una gran variedad de número de pisos, puentes de dimensiones y claros más grandes en los que anteriormente se pensaba por definición en materiales diferentes al concreto, así como las plataformas "Offshore" que se encuentran en el Mar del Norte y obras muy diversas de "aplicaciones especiales" que se encuentran repartidas por distintos países del mundo.

## 1.2 Consideraciones y Definiciones

Se ha demostrado que la producción de concretos de rangos superiores a los 400 kg/cm<sup>2</sup> (39.2 MPa) con materiales convencionales y bajo cuidadoso control de calidad es técnica y económicamente factible<sup>10</sup>. Para la producción de este tipo de concretos algunos investigadores sugieren que son indispensables: el empleo selectivo de materiales, un enfoque diferente en los procedimientos de diseño y elaboración de las mezclas, atención especial en la compactación y un control de calidad más riguroso. Otros recomiendan, además, el empleo de un cemento de finura moderadamente alta y adicionar algún tipo de aditivo que sea benéfico para la obtención de resistencias elevadas y al mismo tiempo que mejore la trabajabilidad.

---

<sup>10</sup> Cfr. CARRASQUILLO, Ramón L., et al., "Propiedades del Concreto de Alta Resistencia Sujeto a Cargas de Corta Duración", *Revista IMCYC*, vol. 19, núm. 125, octubre. 1981. pág. 24

Por otra parte se encontró que no es necesario utilizar un cemento especial porque se han podido elaborar concretos de altas resistencias utilizando cementos de acuerdo a la norma ASTM C 150 de los tipos I, II, y III. Sin embargo, ciertas combinaciones de superplastificante y cemento son mucho más favorables que otras mezclas, sobre todo en lo que concierne a las pérdidas de revenimiento. La utilización del superplastificante es obligatoria, combinada o no con un agente retardador según el comportamiento reológico de las combinaciones mencionadas.

El procedimiento para elaborar concretos de alta resistencia no se basa exclusivamente en usar cantidades excesivas de cemento, sino más bien en la correcta combinación de los elementos y factores que favorecen el aumento de la resistencia, entre éstos se pueden mencionar agregados bien seleccionados y limpios, grava de tamaño pequeño y arena gruesa; cemento Portland normal con módulo de finura alto y contenidos importantes de silicato tricálcico; aditivos químicos superfluidificantes y reductores de agua de gran comportamiento; y, aditivos minerales como la escoria de altos hornos, ceniza volante (fly ash) y microsíllica (sílica fume).<sup>11</sup>

Los investigadores consideran que, en lo que se refiere a los materiales, es primordial una cuidadosa selección tanto del cemento como de los agregados. La composición química y la finura del cemento jugarán un papel importante en su elección, los autores de las investigaciones recomiendan que esta última sea moderadamente elevada junto con un gran porcentaje de silicato tricálcico<sup>12</sup>.

Un agregado grueso de buena calidad es igualmente fundamental, es decir, que tenga una alta resistencia a la compresión, así como que su capacidad de adherencia a la pasta sea buena y una absorción moderada o casi nula. Las

---

<sup>11</sup> Cfr. "State of the Art Report on High Strength Concrete", *Reported by ACI Committee 363*, 1992. pág. 2 a 7

<sup>12</sup> Cfr. FIORATO Anthony E., op. cit. pág. 45.



características anteriores ayudarán a obtener concretos de resistencias más altas en comparación con otros agregados que no cuenten con dichas propiedades. Se menciona también la necesidad de utilizar tamaños pequeños, de un diámetro máximo de 10 a 12 mm, lo más cúbicos o redondos posible, prefiriéndose por esto último a las trituradoras de impacto o de martillo en lugar de las llamadas cónicas<sup>13</sup>. También se encontró que se utilizaron como agregado grueso, rocas trituradas como trapeana, cuarzita, caliza, granito, grava de un depósito de aluvión etc., y comparten la opinión los investigadores de la importancia de la adherencia y la absorción de estos elementos.

En cuanto a la arena se recomienda que tenga un módulo de finura cercano a 3.00<sup>14</sup>, sin embargo, se han realizado mezclas para concretos de alta resistencia con módulos de finura que oscilan entre 2.83 y 3.36.

En la arena, como agregado fino, se han utilizado productos de pizarra, caliza arenisca, andesita etc. aunque en este caso la mayoría de los investigadores concuerdan que su intervención no influye en forma sustancial en la resistencia del concreto e inclusive tolera graduaciones más gruesas de las que marca la norma NOM - C - 77 (ASTM - C - 61).

Frecuentemente se han utilizado cenizas volantes (fly ash) u otros materiales puzolánicos, para reemplazar un pequeño porcentaje de cemento portland, en las mezclas de concreto obteniéndose un incremento significativo a los esfuerzos de compresión, así como un descenso en la producción de calor. Cabe destacar que los beneficios derivados de su uso, dependen en gran medida de la calidad de la ceniza, según se mide ésta por su reactividad al combinarse con la cal libre. También han empleado los investigadores combinaciones cemento/humo de sílice o de cemento/escoria /humo de sílice para fabricar concretos de alta resistencia.

---

<sup>13</sup> Cfr. AITCIN, P, C, op, cit. pág. 9.

<sup>14</sup> Cfr. SAUCIER, Kenneth. L., "Concreto de Alta Resistencia", *Revista IMCYC*, vol. 19, núm 121., mayo 1981. pág. 37.

El humo de sílice o microsílíce (sílica fume o microsílíce) es un material que consiste principalmente de bióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), y es un subproducto que se obtiene durante la fabricación del silicio y ferrosilicio al capturar los humos que se producen en los hornos. Han llegado a coincidir algunos investigadores que se tienen dos efectos principales en el concreto:

- 1) El efecto de un reductor de agua que se refleja en una disminución de la relación agua/cemento, cuando el mineral se adiciona en combinación con un superfluidificante.
- 2) "El efecto inherente", que se refleja en una ganancia en resistencia en los concretos hechos con microsílíce, en comparación con aquellos que no se les agregó y que tienen la misma relación agua/cemento<sup>15</sup>.

Los investigadores sostienen que los beneficios de la microsílíce se presentan al nivel de interfaces entre la pasta y el agregado, según las observaciones realizadas en cuerpos maduros de concreto, el contenido de material no hidratado se reduce significativamente, esta reducción llega a ser casi cero a una distancia de 30 microdeformaciones ( $30 \times 10^{-6}$  m/m) en la zona adyacente al agregado. Este efecto, pudiera ser resultado de la densificación de la microestructura en la zona de transición del agregado, originando una mejor adherencia entre la pasta y el agregado y por lo tanto una mayor resistencia del concreto<sup>16</sup>.

Con relación a los aditivos minerales finamente divididos, MEHTA establece una clasificación de los agregados minerales más habituales, se presenta en la página siguiente en la tabla 1.2.1., así como aspectos generales relativos a su composición química, mineralógica y características de sus partículas.

---

<sup>15</sup> Cfr. SCRIVENER, K.L., et. al. "Quantitative Characterization of the Transition Zone in High Strength Concretes", *Advances in Cement Research*, vol. 1, núm 4, october 1988. pág. 230.

<sup>16</sup>Ibid., págs. 234 a 237.

CLASIFICACIÓN	COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA	CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS
<b>CEMENTANTES Y PUZOLANAS</b> - Escorias de Alto Horno (Cementante)	Habitualmente, silicatos vítreos de calcio, magnesio, aluminio y sílice. Pueden contener pequeñas cantidades de compuestos cristalinos del grupo de la melilita.	Antes del tratamiento, similares a la arena, conteniendo un 10 a 15% de humedad.
- Cenizas volantes altas en calcio (Cementante y puzolana)	Mayoritariamente, silicatos vítreos conteniendo calcio, magnesio, aluminio y álcalis. Pequeñas cantidades de materia cristalina en forma de SiO <sub>2</sub> , AC <sub>3</sub> , CaO libre, periclasa, SC, y SA <sub>3</sub> C <sub>4</sub> . El calor inquemado es menor del 2%.	Polvo con un 10% a 15% de partículas >45 μm (3000 – 4000 cm <sup>2</sup> /g Blaine). Son esferas sólidas de φ < 20 μm, de superficie lisa y menos limpia que las cenizas volantes bajas en calcio.
<b>PUZOLANAS MUY ACTIVAS</b> - Humo de Sílice	Fundamentalmente, sílice pura en estado vítreo.	Polvo finísimo de esferas sólidas de 0,1 μm de φ y una superficie específica de 20 m <sup>2</sup> /g por absorción de nitrógeno.
- Cenizas de Arroz (Mehta-Pitt Proceso)	Fundamentalmente, sílice pura en estado vítreo.	Partículas < 45 μm y una superficie específica de 60 m <sup>2</sup> /g por absorción de nitrógeno.
<b>PUZOLANAS NORMALES</b> - Cenizas volantes (Bajas en Calcio)	Mayoritariamente, silicatos vítreos que contienen aluminio, hierro y álcalis. Adicionalmente, una pequeña porción cristalina de cuarzo, mullita, silimanita, hematites y magnetita.	Polvo con un 10% A 15% de partículas > 45 μm. Sup. Blaine de 2000 a 3000 cm <sup>2</sup> /g. La mayoría de partículas son esferas sólidas con un φ de 20 μm Cenosferas y plerosferas.
- Puzolanas naturales	Junto a silicatos de aluminio vítreos, puzolanas naturales conteniendo cuarzo, feldespato y mica.	Las partículas son >45 μm y presentan textura áspera.
<b>PUZOLANAS POCO ACTIVAS</b> - Escoria de alto horno, enfriadas lentamente, cenizas de hogar, escorias de caldera y cenizas de arroz normales	Silicatos cristalinos con una pequeña proporción de materia vítrea.	Los materiales deben pulverizarse hasta un grado muy fino para que desarrollen su actividad puzolánica. Las partículas molidas tienen una textura rugosa.

Tabla 1.2.1. Clasificación y características de los aditivos minerales<sup>17</sup> más habituales.

<sup>17</sup> METHA, P. K., "Concrete Structures, Properties and Materials", Prentice Hall Inc. 1986.

Por último, para la obtención de concretos de alta resistencia es necesario añadir un aditivo químico que sea compatible con el cemento, para que por una parte le dé mejor trabajabilidad a la mezcla, y por otra reduzca la relación agua/cemento, pues esto siempre es benéfico para la obtención de resistencias mayores. Los aditivos más utilizados son los de la familia de los hidrocarboxílico o de lignosulfonato.

Con respecto a esta clase de aditivos podemos mencionar que las moléculas de lignosulfonato (figura 1.2.1), extraídas de los desechos de la pasta de papel, se caracterizan por poseer una estructura molecular más larga que la de los reductores de agua, lo que permite un recubrimiento más efectivo de las partículas de cemento. Adicionalmente, presentan un alto grado de "adherencia lateral" que favorece la formación de uniones entrecruzadas y flóculos esféricos (microgeles), en vez de largas cadenas de polímeros que, al no formar flóculos, son mejores dispersantes del sistema cemento - agua.

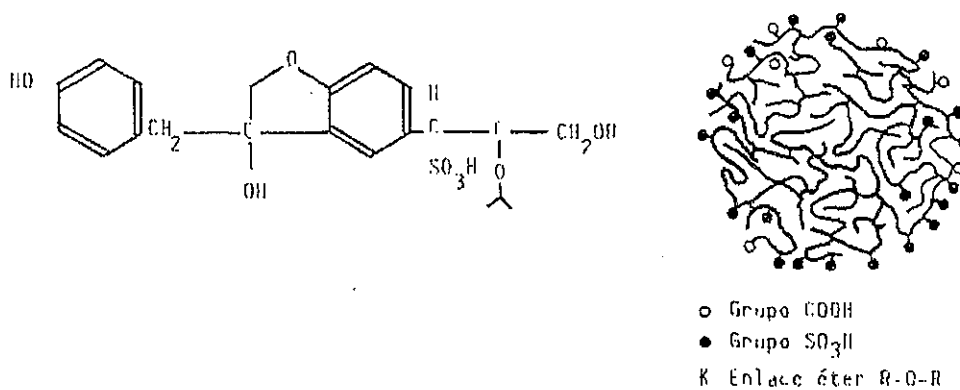
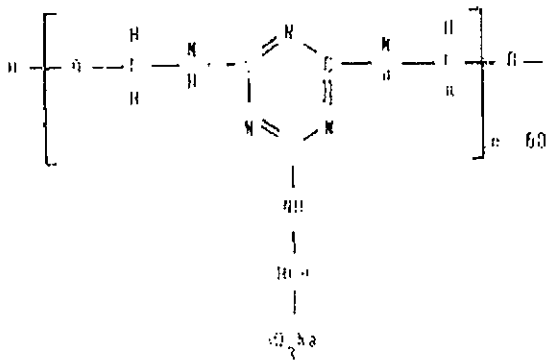


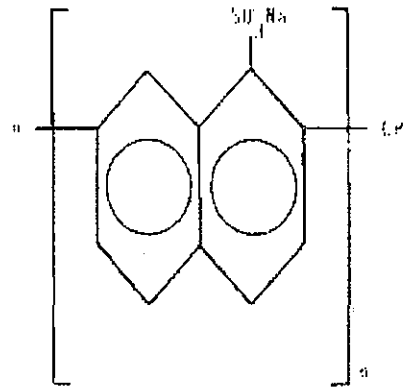
Figura 1.2.1. - Representación esquemática de una molécula de lignosulfonato según Rixom<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Cfr. RIXOM, M. R., *Chemical Admixtures for Concrete, (Water Reducing Agents)*, E & F. N. Spon Ltd, Halsted Press, London, 1978. págs. 6 y 7.

Como ya se mencionó es hasta 1970 cuando la industria del concreto se beneficia plenamente de los reductores de agua de alto rango, prácticamente en la misma época comienzan a utilizarse dos policondensados de formaldehído y melamina sulfonada (Alemania), o de formaldehído y naftaleno sulfonado (Japón), las cuales se ilustran en la figura<sup>19</sup> 1.2.2. Ambas familias de moléculas reciben el nombre de superfluidificantes, reductores de agua de alto rango o superplastificantes.



MOLÉCULA DE POLICONDENSADO DE FORMALDEHÍDO Y MELAMINA SULFONADA



MOLÉCULA DE FORMALDEHÍDO Y NAFTALENO SULFONADO

Figura 1.2.2

Al respecto Aitcin, menciona que la forma lineal y alargada de estas moléculas (figura 1.2.3), que permite el recubrimiento total de las partículas de cemento incorporándolas a cargas de signo negativo que, neutralizando las fuerzas de atracción electrostáticas existentes entre dichas partículas, dificultan extraordinariamente el fenómeno de floculación.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>19</sup> AITCIN, P. C., "Les fluidifiants, des réducteurs d'eau pas comme les autres", *Rev. Annales de l'Institut Technique du Batiment y des Travaux. Publics No 473, Mars - Avril, 1989.* pág. 153.

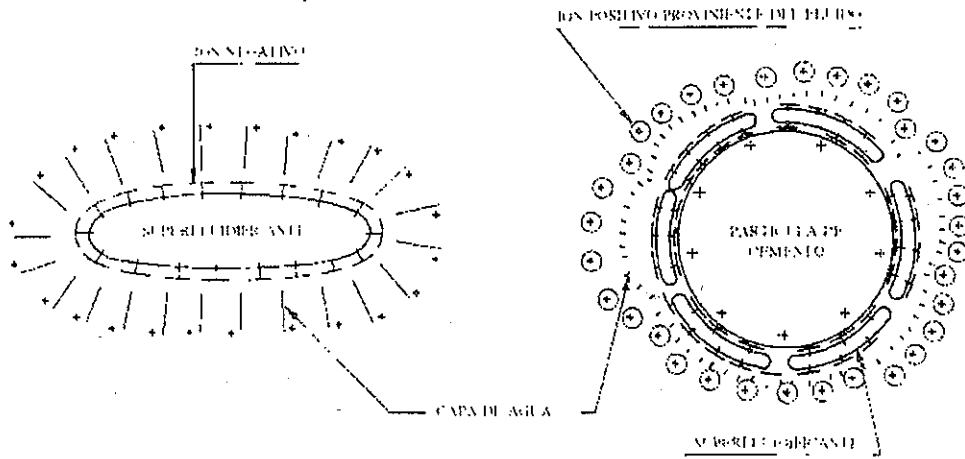


Figura 1.2.3. - Actuación de una molécula de superfluidificante según Aitcin<sup>20</sup>

Por el efecto envolvente de estos productos, el empleo de dosificaciones muy elevadas del aditivo puede retrasar la hidratación de los granos de cemento. El tiempo de retraso depende de la melamina o naftaleno, así como del tipo de cemento y de la finura del mismo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>20</sup> Ibid. , pág. 153

# **CAPÍTULO 2**

## **MATERIALES**

## CAPÍTULO 2. Materiales.

### 2.1. Introducción

En la producción de concretos normales o de alta resistencia es indudable que se requiere una adecuada trabajabilidad y resistencia, requiriendo con ello una buena selección de materiales en ambos casos, siendo más estrictas las condiciones de calidad de ellos para la obtención de concretos con resistencias superiores. Probablemente debamos tomar en cuenta que estos últimos, son considerados como concretos especiales y que, por consiguiente, los procedimientos a emplear para su obtención poco o nada tienen que ver con los habitualmente utilizados en el concreto convencional, por ello una primera actividad obligada, antes de intervenir en cualquiera de las fases implicadas en su proceso de elaboración, es el conocimiento de los materiales a utilizar<sup>21</sup>.

Por lo anterior es necesario mencionar la, definición dada por el comité 211 del American Concrete Institute:

El concreto se compone principalmente de agregados, cemento Portland o cemento combinado, agua, y en algunos casos puede tener otros materiales cementantes y/o aditivos químicos. También puede contener cierta cantidad de aire atrapado o deliberadamente incluido, que se obtiene mediante el empleo de un aditivo o de un cemento inclusor de aire<sup>22</sup>.

### 2. 2. Cementos

En México existen varias empresas o agrupaciones que se dedican a la fabricación de cemento, indudablemente existen unas normas mínimas de calidad que deben cumplir, pero independientemente de ello, los diferentes cementos comerciales disponibles en la actualidad varían significativamente en su

---

<sup>21</sup> CFR, "State of the Art... , op. cit., págs. 2 y 3.

<sup>22</sup> *Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1 – 91)*, trad. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, 1993. pág. 11.



composición química y finura de molido, lo que incide en la demanda de agua que cada uno de ellos necesitará para obtener la llamada "consistencia normal" de la pasta.

La producción de cementos Portland en la zona metropolitana es muy variada en tipos y marcas, pero todos deben cumplir con las normas oficiales mexicanas, siendo éstas la NOM - C - 1<sup>23</sup> (ASTM - C - 150) para los cemento tipo I al V y el Blanco; la NOM - C - 2<sup>24</sup> (ASTM - C - 595) para los puzolánicos y; la NOM - C - 175<sup>25</sup> (ASTM - C - 595) para el de escoria de alto horno. Sin embargo, es pertinente proceder de manera realista en este aspecto, es necesario primero hacer un recuento de las clases y tipos de cemento para concreto hidráulico que efectivamente se producen, o pueden producirse, en las fábricas del país, incluyendo sus respectivas características, usos generales indicados. La tabla 2.2.1. presenta esta información, de acuerdo con las condiciones de producción.

En ningún momento debemos olvidar que en la actualidad las tecnologías de fabricación de cemento se mejoran continuamente y una tendencia mundial es la obtención de una mayor uniformidad en el producto. Como ya se mencionó anteriormente respecto a su fabricación las diferentes marcas de cementos en el país cubren las normas nacionales, sin embargo, tienen variaciones que obligan a los usuarios a ajustar sus proporciones con el fin de llegar a las características requeridas.

---

<sup>23</sup> Norma Oficial Mexicana (NOM C -1), "Calida para Cementos Portland", Dirección General de Normas, México D.F.,1980

<sup>24</sup> Norma Oficial Mexicana (NOM C -2), "Calidad para Cemento Portland - Puzolana", Dirección General de Normas, México D.F.,1986

<sup>25</sup> Norma Oficial Mexicana (NOM C -175), "Calidad para Cemento Portland de Escoria de Alto Horno", Dirección General de Normas, México D.F.,1969

## CEMENTOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO NORMALIZADOS EN MÉXICO

Tipo	Producción	Características y uso propuesto	Opciones
<b>1) Cementos Portland simples: NOM - C - 1</b>			
I	Normal	Para uso general en construcciones de concreto, cuando no se requieren las propiedades especiales de los otros tipos	FF, BA
II	Normal	Destinado a construcciones de concreto expuestas a una acción moderada de los sulfatos o en donde se requiere moderado calor de hidratación.	FF, BA, MH
III	Limitada	Para la elaboración de concretos en los que se requiere alta resistencia a edad temprana	FF, BA, MS, AS
IV	No se produce		
V	Limitada	Cuando se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos	FF, BA
Blanco	Normal	Para usos donde se requiere el color blanco en vez del gris. Se clasifica de acuerdo con la composición química del clinker	
<b>2) Cementos mezclados Portland – puzolana: NOM - C - 2</b>			
Puz - 1	Normal	Cemento Portland – puzolana, para uso general en construcciones de concreto.	FF, MH, MS AS, EXP
Puz - 2	Normal	Cemento Portland – puzolana, para uso en construcciones de concreto donde no son requeridas resistencias altas a edades tempranas.	FF, MH, MS AS, EXP
<b>3) Cementos Portland – escoria de alto horno: NOM - C - 175</b>			
I	Discontinuada	Para uso general	
II	Discontinuada	Cuando se requiere un moderado calor de hidratación y una moderada resistencia a los sulfatos.	

Opciones. - Solamente aplicable previo acuerdo entre el comprador y el fabricante.

FF	Fraguado falso: la penetración final no debe ser menor del 50% de la inicial, en la prueba por el método de pasta de cemento NOM - C - 132
BA	Bajos álcalis: el contenido de álcalis totales, expresados como Na <sub>2</sub> O, no debe exceder de 0.60%.
MH	Moderado calor de hidratación: se puede especificar alternativamente que la suma C <sub>3</sub> A + C <sub>3</sub> S no exceda de 58%, o bien que el calor de hidratación no exceda de 70 cal/g a los 7 días, de 80 cal/g a los 28 días. Si se especifica cualquiera de estos requisitos opcionales alternativos, la resistencia a compresión especificadas a 3, 7 y 28 días debe reducirse en 20%.
MS	Moderada resistencia a los sulfatos: el contenido de aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) en el cemento (o en el clinker si es Portland – puzolana) no debe exceder de 8%.
AS	Alta resistencia a los sulfatos: el contenido de aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) en el cemento (o en el clinker si es Portland – puzolana) no debe exceder de 5%.
EXP	Inhibición de la expansión debida a la reacción álcali – agregado (sólo para cementos portland – puzolana): la expansión en mortero con vidrio de borosilicato como agregado (NOM - C -180) no debe exceder de 0.20% a los 14 días, ni de 0.05% a los 91 días.

Continúa...

Observaciones.- Acerca de las condiciones de producción.

Producción normal.- No significa que el cemento indicado se produzca en todas las fábricas, sino que se encuentra normalmente disponible en el mercado nacional.
Producción limitada.- Significa que no se encuentra normalmente disponible en el mercado nacional, pero que puede ser producido por algunos fabricantes mediante un convenio específico con el comprador
Producción discontinuada.- Significa que el cemento se produjo en el pasado, porque existen normas nacionales aplicables, pero no se produce en la actualidad.

Tabla 2.2.1. – Diversos tipos de cemento<sup>26</sup> para concreto hidráulico.

Actualmente una de las variantes en la fabricación, se presenta en la finura de la molienda lo que según los investigadores afecta directamente la resistencia de los concretos. Otro factor que genera variación en ella es sin lugar a dudas la falta de consistencia de la composición química de los insumos. Hoy en día existen dos procesos que reducen esta variabilidad: uno es el diagnóstico y dosificación de la materia prima, para ello algunas fábricas han implantado controles automáticos que a través de rayos gamma hacen un análisis químico de los materiales que ingresan al proceso, en sustitución de las tradicionales reacciones químicas o de los rayos X donde estos últimos implican correcciones a los lotes ya fabricados.

El segundo es mejorar es la uniformidad en la molienda, a este respecto el estándar es los molinos de bolas, proceso que se está mejorando al cambiar otro tipo de molinos que reducen aproximadamente en un 10% la variabilidad con respecto a la producida por los molinos estándar utilizados, conjuntamente con ello los separadores de cuarta generación aseguran una alta eficiencia.

### 2.3. Agregados gruesos y finos

Algunos estudios indican que para mejorar las propiedades mecánicas de los concretos que se emplean en el Distrito Federal, es necesario emplear gravas

<sup>26</sup> Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM. *Manual de Tecnología del Concreto., Sección I*, ed. LIMUSA, México, 1994. págs. 15 y 16.

densas y con la menor absorción posible, se menciona que las gravas calizas tuvieron un comportamiento satisfactorio en cuanto a todas las propiedades mecánicas de los concretos que se habían estudiado (normales). No se debe olvidar que en la producción de agregados gruesos, dentro de la zona metropolitana, también existen los de piedra basáltica y los de andesita, que durante muchos años fueron utilizados principalmente por economía.

En México, es fácil encontrar los tres tipos de rocas mencionadas, pero como tendencia general predominan las de tipo ígneo, particularmente en toda la porción occidental del país; en segundo término se hallan las rocas sedimentarias que abundan en las regiones centro - norte, oriente y sur - sureste; por último, las rocas metamórficas son las menos frecuentes y se ubican en el territorio nacional en forma más o menos errática. En la figura 2.3.1 se indica la existencia predominante de las rocas, de acuerdo con su origen geológico, en las 15 provincias fisiográficas en que se subdivide la República Mexicana<sup>27</sup>. Es pertinente aclarar que, tratándose de la ubicación de las rocas fragmentadas que constituyen los agregados naturales, pueden hallarse a considerables distancias de las rocas que les dieron origen, debido a su transporte por el agua de las corrientes fluviales, el viento o las fuerzas que se liberan de las erupciones volcánicas.

Es oportuno mencionar que la calidad física de las calizas es muy variable, desde muy mala hasta muy buena calidad en términos generales, de acuerdo a la norma ASTM - C - 294. Por ejemplo, una caliza muy suave es la llamada "Creta" que la podemos localizar en la Península de Yucatán, donde se le denomina "sashcab", sus características particulares la hacen inadecuada como agregado en el concreto de alta resistencia o cuando contiene porcentajes altos de dolomita lo que ocasiona que se vuelva reactiva con los álcalis en el concreto.

---

<sup>27</sup> Ibid, pág. 85

## MARCO FISIAGRÁFICO DE LA REPUBLICA MEXICANA

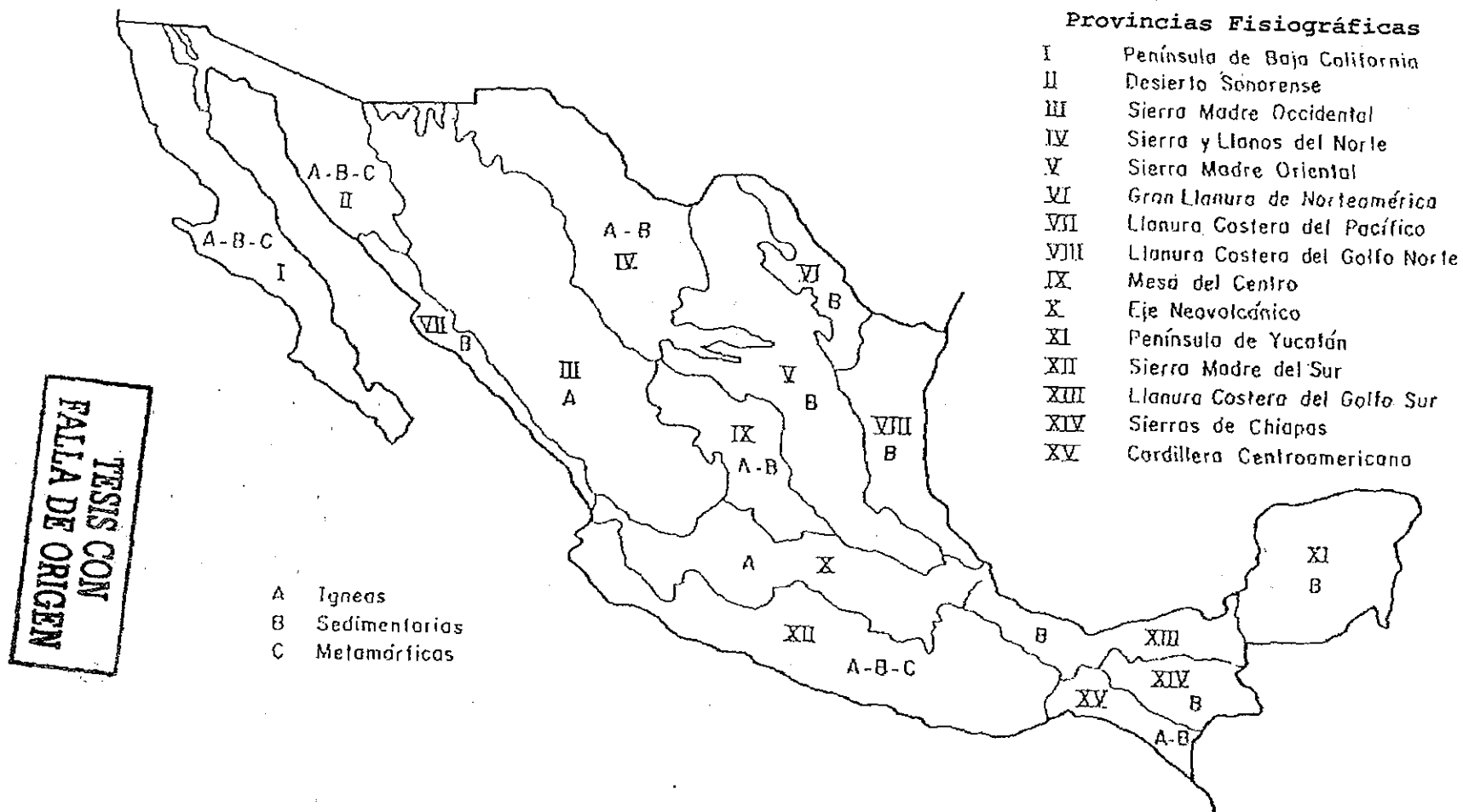


Figura 2.3.1. – Distribución fisiográfica de la República Mexicana, donde se muestra la distribución aproximada de las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.

La arena más usual en el empleo de concreto es sin lugar a dudas la Andesita del grupo felsítico de las rocas ígneas extrusivas (volcánicas), porque resultan ser las únicas, desde el punto de vista económico, viables para la fabricación de los concretos en el Distrito Federal<sup>28</sup>. Sin embargo, se recomienda limitar la cantidad de finos (un máximo de un 5%), es decir, los porcentajes mínimos (en peso) del material que pasa las mallas 0.3 mm (N° 50) y de 0.15mm (N° 100) que sean reducidos a 5% y 0%, respectivamente, siempre y cuando el agregado se emplee en un concreto con aire incluido que contenga más de 237 kg. de cemento por m<sup>3</sup> y que tenga un contenido de aire superior de 3%; o bien cuando el agregado se emplee en un concreto que contenga más de 297 kg. de cemento por m<sup>3</sup> cuando el concreto no tenga inclusión de aire. En estos casos se debe usar un aditivo mineral aprobado para compensar la deficiencia del material que pase estas dos mallas. También debe cumplir con otra serie de requerimientos que marca la norma ASTM-C-33, especialmente en los casos de los finos plásticos que contienen los agregados es necesario para que la contracción lineal de estos finos sea nula, en otras palabras, para que ocurra esto último, deberá de estar exenta de finos plásticos<sup>29</sup>.

Una investigación realizada, declara que un módulo de finura abajo de 2.5 en la arena da al concreto una consistencia pegajosa y difícil de compactar, y una con un módulo alrededor de 3.0 da una mejor trabajabilidad y resistencia a la compresión<sup>30</sup>.

#### 2.4. Aditivos químicos y minerales

En la producción de concretos de alta resistencia los aditivos se emplean continuamente, tanto químicos como minerales, por lo cual una nueva

<sup>28</sup> Cfr. MENDOZA, Carlos Javier, y MENA F., Manuel, "Influencia de los Agregados en los Concretos Estructurales del D. F.", *Revista IMCYC*, vol. 25, núm. 192, mayo 1987, pág. 18 y 19.

<sup>29</sup> Cfr. "Standar Specification for Concrete Aggregates", (ASTM C 33-93), *Annual Book of ASTM Standars*, vol. 04.02, págs. 11 y 12.

<sup>30</sup> Cfr. Blick, Ronald L., et. al., "Proportioning and Controlling High-Strength Concrete", *Proportioning Concrete Mixes*, SP-46, American Institute Detroit, 1974, pág. 147.

consideración es la optimización del sistema cemento - aditivo, esta optimización se requiere porque dependiendo del aditivo usado se tendrán diferentes efectos de acuerdo con el tipo y marca de cemento empleado, dado que la reacción es de acuerdo a las cantidades de los componentes químicos de ellos. Por lo tanto el incremento de la resistencia del concreto estribará tanto por las características propias del aditivo como del contenido químico del cemento<sup>31</sup>.

De acuerdo al párrafo anterior el paso siguiente será la determinación del aditivo a emplear, al respecto, los químicos más usados para la elaboración de este tipo de concreto son:

a) Retardantes (ASTM-C-494, tipo B y D). - Un aditivo retardante es frecuentemente benéfico para controlar la hidratación temprana, puede controlar la rapidez de fraguado y proveer más flexibilidad en la hora del colado. Debido a que frecuentemente provee un incremento a la resistencia, ésta será proporcional a la relación de la dosificación. Las mezclas pueden ser diseñadas para diferentes cantidades si se supone una diferencia significativa en las proporciones de los materiales que componen el concreto.

b) Reductores de agua de fraguado normal (ASTM-C-494, tipo "A"). - Los reductores de agua típicos proveen mejoras en la resistencia sin alterar la velocidad de fraguado del concreto, su selección deberá basarse sobre el desarrollo de las resistencias porque al optimizar la dosificación se tendrán mayores resistencias, al reducir su relación agua/cemento, pero se podría prolongar el tiempo de fraguado.

La efectividad de los reductores de agua en el concreto es función de su propia composición química; de la temperatura del concreto; de la composición química,

---

<sup>31</sup> Cfr. Ibid., pág. 145.

finura y contenido del cemento; y de la presencia de otros aditivos. Generalmente disminuyen entre el 5% y 10% el contenido de agua.

- c) Reductores de agua de alto rango, superfluidificantes o superplastificantes empleados a menudo como sinónimos. (ASTM-C-494, tipos "F" y "G"). - Una de sus aplicaciones consiste en utilizarse para fabricar concretos de baja relación agua/cemento y de alta resistencia con trabajabilidades dentro de los límites normalmente especificados para consolidar por medio de vibración interna. Con su empleo se puede obtener una reducción de agua entre el 12% y 30%, con esta reducción en la relación agua/cemento permite obtener resistencias superiores a compresión tanto a edades tempranas como últimas<sup>32</sup>.

Los aditivos minerales finamente divididos consisten principalmente en cenizas volantes (fly ash), humo de sílice o microsílíce (silica fume) y el cemento de escoria son los más usados frecuentemente para aumentar la resistencia del concreto, entre otros efectos que pueden producir.

- a) Las cenizas volantes usadas están clasificadas, de acuerdo a la norma ASTM-C-618, en las clases " F " y " C ". Las primeras son normalmente producidas por la calcinación de antracita o carbón bituminoso y tienen propiedades puzolánicas, pero muy pocas o nulas de tipo cementante. Las segundas se obtienen por la calcinación de lignito o carbón subbituminoso y además de las propiedades puzolánicas tienen algunas propiedades cementantes autógenas. Es extremadamente importante que este aditivo mineral sea examinado, aceptado por una investigación detallada y uniforme, para producir resistencias propias y compatibles con los otros materiales en las mezclas de concretos de alta resistencia.

---

<sup>32</sup> Cfr. KOSMATKA, Steven H. y PANARESE, William C., *Diseño y Control de Mezclas de Concreto, (Aditivos para el Concreto)*, trad. Ing. Manuel Santiago Bringas, IMCYC, México, 1992. págs. 67 a 72.



- b) Humo de sílice o microsílíce es un aditivo que resulta de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. Su alto contenido de sílice y su extremada fineza lo hacen un efectivo material puzolánico. El microsílíce reacciona puzolánicamente con la cal durante la hidratación del cemento. Es necesario, en la utilización de este aditivo mineral, la adición de un superplastificante para poder dar el revenimiento requerido, manteniendo así la trabajabilidad en el concreto.
  
- c) Por último, el cemento de escoria, consiste en una escoria granulada de alto horno molida, fabricada a partir de la escoria de alto horno de hierro, siendo un producto no metálico que consiste principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en los altos hornos. Dicha escoria se clasifica de acuerdo a la norma ASTM-C-989. Las clases de cementos de escoria portland son cubiertas por la norma ASTM-C-595<sup>33</sup>.

## 2.5. Agua

El agua para producir concreto como se sabe debe ser incolora, insabora e inodora, es decir, ser clara y evidentemente limpia, en caso de contener sustancias que la decoloren o le den sabores u olores extraños, indeseables o sospechosos, no debe usarse, a menos que existan registros de concretos elaborados con éstas y que no afecten la calidad del mismo<sup>34</sup>. Los parámetros ideales que deben cumplir las aguas naturales o contaminadas, diferentes de las potables, para el uso y curado del concreto se encuentran en la norma mexicana NOM - C -122<sup>35</sup>. En este caso se empleará, en el mezclado del concreto que se fabricará, el agua potable que se encuentra en las tomas de los laboratorios del Área de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana.

---

<sup>33</sup> Cfr. *Ibid.*, págs. 72 a 77.

<sup>34</sup> Cfr. "Especificaciones estándar para el concreto premezclado", *ASTM-C-94-96*, trad. IMCYC, México, 1996. pág. 3

<sup>35</sup> "Agua para Concreto", (NOM-C-122), *Norma Oficial Mexicana*, Dirección General de Normas, México, 1982.

# **CAPÍTULO 3**

## **TECNOLOGÍA DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**

### CAPÍTULO 3. Tecnología del concreto de alta resistencia.

#### 3.1. Diferentes procedimientos en la elaboración de concretos de alta resistencia

En la actualidad no existe una técnica, ni metodología específica para la elaboración de concretos de altas resistencias, sin embargo, algunos investigadores mencionan en sus reportes y artículos algunos principios básicos, metodología o técnicas para la obtención de estos tipos de concretos.

Se menciona que se puede obtener concreto de resistencia mayor a  $815 \text{ kg/cm}^2$  (80 MPa) con la tecnología actual incluyendo métodos complementarios como por ejemplo:

- A. Mezclado previo del cemento y del agua (lechada) con una revoladora de alta velocidad.
- B. Uso de aditivos, por ejemplo, superfluidificantes.
- C. Compactación de mezclas muy secas mediante rodillos vibratorios.
- D. Impregnación con polímeros.
- E. Limitación o confinamiento del concreto en dos direcciones<sup>36</sup>.

Así mismo, basados en sus pruebas, Klieger recomendó los siguientes medios para obtener concretos de alta resistencia temprana:

- 1. Use mezclas de baja relación agua cemento
- 2. Use cemento tipo III
- 3. Use vibración mecánica para permitir más agregados por unidad de volumen.
- 4. Use vapor saturado a presión atmosférica a temperaturas por debajo del punto de ebullición del agua, junto con aislamiento.
- 5. Controle cuidadosamente la granulometría del agregado, los pesos de la mezcla de prueba, el mezclado, la compactación y el curado.
- 6. Use curado por agua durante las primeras horas de la hidratación<sup>37</sup>.

Algunos investigadores usan como técnicas para la producción de concretos de alta resistencia su composición, una alta velocidad de mezclado en la mezcla y un

<sup>36</sup> Cfr. "Concreto de Alta Resistencia: Técnicas de Producción", *Revista IMCYC*, vol. 22, núm. 164, diciembre, 1984, págs. 15 y 16.

<sup>37</sup> FIORATO, Anthony, E., op. cit, pág. 44.

revibrado, y la utilización de un aditivo para incrementar la resistencia del concreto, se puede mencionar de la técnicas<sup>38</sup>:

La composición incluye la adición de un pequeño porcentaje de tierra fina y la hidratación completa del cemento Portland en la mezcla de concreto fresco. Se supone que lo anterior es para ayudar en el incremento a la resistencia al esfuerzo de compresión, sin embargo, el mecanismo por el cual se produce no esta plenamente explicado.

El proceso de una alta velocidad de mezclado, involucra el avance de la preparación de la mezcla agua/cemento (lechada), la cual, será combinada con los agregados para producir el concreto. Así se obtiene un esfuerzo superior de compresión, es presumiblemente atribuible a la más eficiente hidratación del cemento, resultado del contacto directo de las partículas de éste y el agua, llevado a cabo en el mezclado vigoroso de la pasta.

La revibración está encaminada a lo complejo del proceso de endurecimiento o al principio del proceso de hidratación del cemento. Por lo menos dos teorías han sido propuestas para pretender explicar el incremento en el esfuerzo. En la primera, se confía que el mortero y concreto, por la revibración, será más densamente consolidado, ello permitirá usos más provechosos de los productos de hidratación. La segunda, afirma que el proceso de vibración en algunas direcciones acelera y prolonga la producción de hidratos y, consecuentemente, incrementa el esfuerzo.

Por otra parte encontramos que F. DE LARRARD desarrolla un procedimiento basado en realizar la mayoría de los ensayos sobre materiales modelo: Lechada para los ensayos reológicos y morteros para los ensayos mecánicos.

---

<sup>38</sup> Cfr. MACINNIS, Cameron, y THOMSON, Donald V., "Special Techniques for Producing High Stregth Concrete", *ACI Journal*, vol. 67. núm 12, december, 1970. pág. 997.

El proceso completo de la dosificación propuesto por Larrard<sup>39</sup>, se expone pormenorizadamente a continuación:

1° Adoptada una composición granulométrica de agregados adecuada (definida previamente siguiendo el método de estudio de mezclas experimental, u otro que al menos adopte como referencia una curva granulométrica válida), se dosifica un concreto de control que contenga gran cantidad de superplastificante y una cantidad de cemento que corresponda a la menor demanda de agua - como primera aproximación, pueden adoptarse  $425 \text{ kg/m}^3$  -. El contenido de agua de este concreto de control debe ajustarse para obtener una trabajabilidad correcta, susceptible de ser controlada mediante un aparato dinámico (por ejemplo, el consistómetro Vebe).

2° Se determina la fluidez de la pasta del concreto de control mediante la medida de su tiempo de flujo a través del cono de Marsh (Figura 3.1.1.). La relación agua/cemento de esta pasta debe establecerse en condiciones controladas de humedad de los agregados.

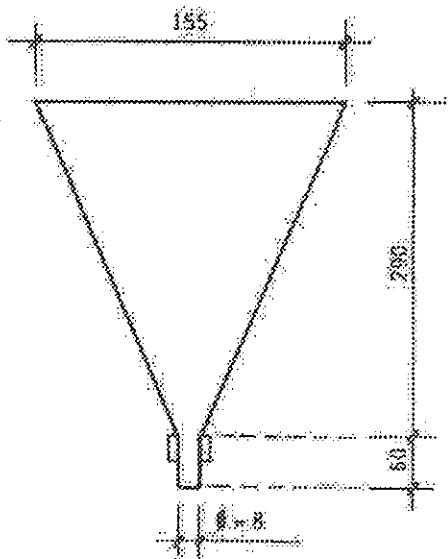
3° Se dosifican diferentes lechadas mediante la variación de los porcentajes de composición de cemento y agregados.

4° Por cada lechada se añade una pequeña cantidad de superplastificante y se ajusta la cantidad de agua para obtener una pasta adhesiva (sí bien que pase a través del cono en un tiempo de flujo aproximadamente igual a 20 segundos). Con la relación agua/cemento fijada momentáneamente, se añaden cantidades crecientes de superplastificante hasta que el tiempo de flujo no disminuya más. Esta cantidad de superplastificante representa el valor de saturación (Figura 3.1.2.) y se mantiene fijo de una vez por todas.

---

<sup>39</sup> DE LARRAD, F., "A Method for Proportioning High Strength Concrete Mixtures", *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, vol. 12.No. 2, summer 1990., págs. 49 y 50.

5°. Se ajusta el contenido de agua para obtener el mismo tiempo de flujo que en la lechada de control. En consecuencia, la relación agua/cemento debe ajustarse para cada pasta.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.1.1.- Cono de Marsh (dimensiones en mm)

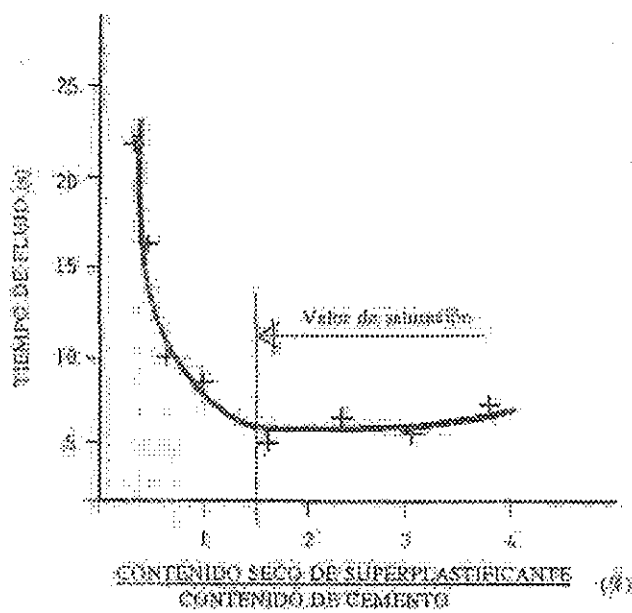


Figura 3.1.2.

6°. Se determina la variación de las características de flujo en el tiempo de duración previsto para la puesta en obra del concreto. Si el tiempo de flujo se incrementa en exceso, debe añadirse un agente retardante para mantenerlo en el valor de referencia\*.

7°. Se determina la resistencia a compresión de los diferentes morteros dosificados, mediante ensayos directos o, estimativamente, utilizando la fórmula de Feret modificada.

8°. Se establece una primera dosificación del concreto de alta resistencia usando los materiales granulares y el mismo volumen de pasta que en el concreto de control, e incorporando la corrección de agua que corresponda en función de la humedad de los áridos en el momento del mezclado. De acuerdo con el modelo de Farris, el concreto de alta resistencia y el concreto de control tendrán la misma trabajabilidad.

9°. Se verifica la idoneidad de la consistencia y resistencia resultantes.

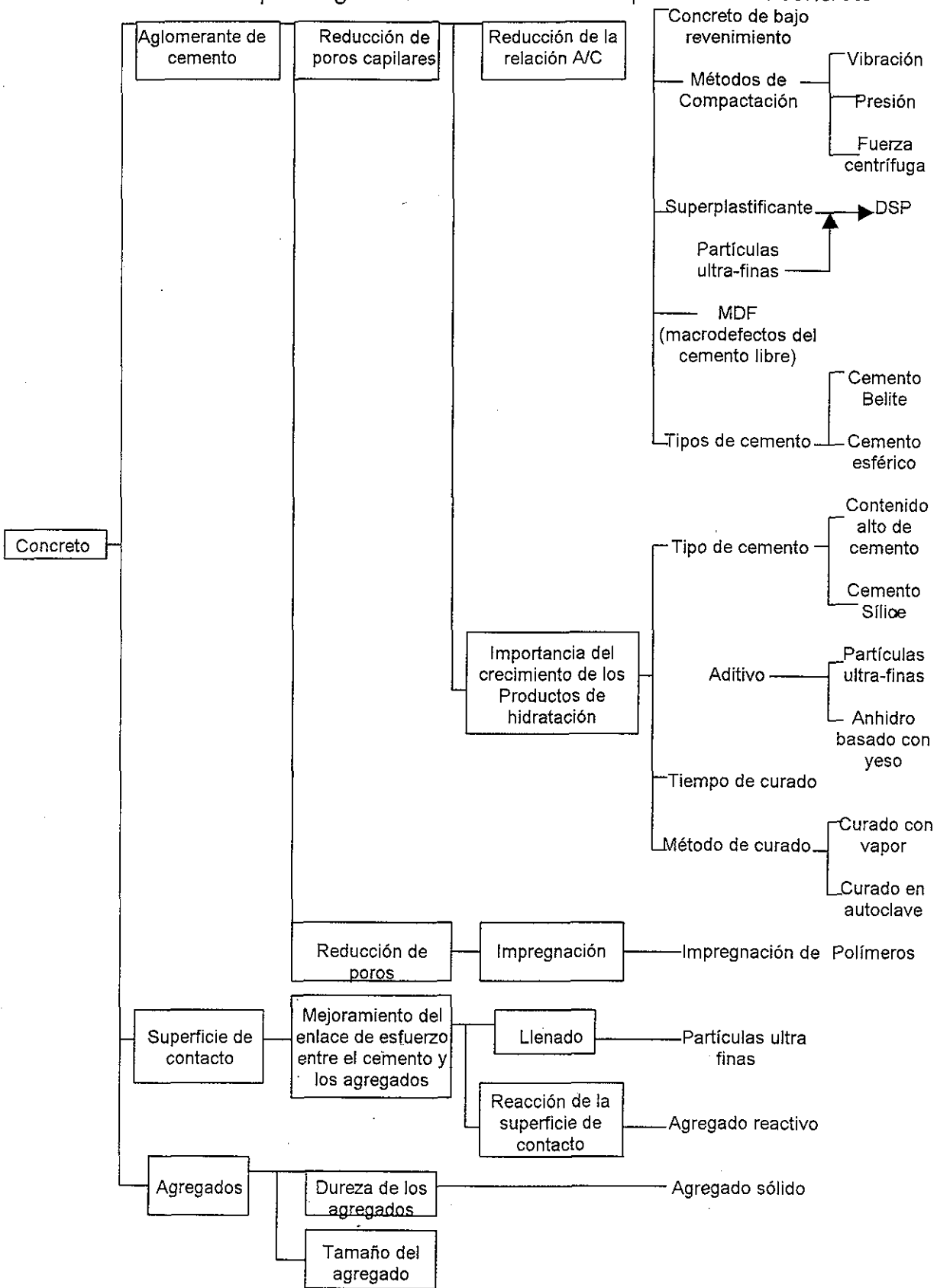
Por otra parte, según los estudios realizados en los últimos años en Japón, para construcciones elevadas que están relacionadas especialmente con el Proyecto Nacional Japonés, los métodos más empleados para desarrollar altas resistencias en el concreto son muchos, pero se pueden resumir estas técnicas, las cuales se pueden representar en la tabla<sup>40</sup> (3.1.3.) de la pagina siguiente.

---

\* El concreto en tiempo caluroso puede también simularse mediante el calentamiento de los componentes antes del mezclado y manteniendo la pasta en un contenedor con temperatura controlada.

<sup>40</sup> SAKAI, E., "Técnicas para lograr altos esfuerzos de compresión en el concreto" *Cement Concrete*. núm. 535. 1991. pág. 25.

Tabla 3.1.3. Técnicas para lograr altos esfuerzos de compresión en el concreto





El desarrollo de esfuerzo en el concreto primeramente depende de las características de la pasta de cemento endurecida y de los agregados, así como de la superficie de contacto entre ambos elementos. Es bien conocido que la resistencia de la pasta endurecida depende de su grado de porosidad, y existen principios que han sido propuestos para explicar la relación entre porosidad y resistencia. De acuerdo con éstos, si se tiene una baja relación de poros obtendremos mayores resistencias. Por lo tanto, para poder lograr un aumento en la resistencia es necesario la reducción de poros capilares. Esto se ha logrado reduciendo la relación agua/cemento que resulta de un incremento de la cantidad de los hidróxidos generados durante el proceso de hidratación. Otra forma de reducir los poros capilares es mediante la impregnación del concreto con polímeros, además, dicha impregnación es una forma de incrementar la resistencia<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Cfr. SCRIVENER, K. L., op. cit. pág. 230 y 231.

# **CAPÍTULO 4**

## **MEZCLAS DE PRUEBA**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPÍTULO 4. Mezclas de Prueba.

### 4.1.- Consideraciones previas

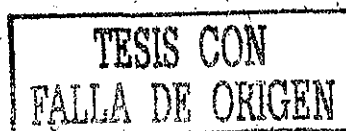
Antes de poder realizar el programa de elaboración de mezclas de prueba es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Es importante tratar de indicar, de acuerdo con la información de los dos capítulos anteriores, los materiales con los que se puede disponer para poder dar inicio con nuestro trabajo.

En México existen varias marcas y tipos de cemento, indudablemente que varían en su composición química y finura de molido. Pero ha quedado establecido previamente que dependiendo de la composición química de este se producen reacciones diferentes con los aditivos, por ende con los reductores de agua. En ocasiones implican efectos favorables o desfavorables al endurecimiento inicial del concreto y, dependiendo del momento de su inclusión en el proceso de mezclado, pérdida de trabajabilidad en el mismo, entre otros efectos que también suelen ser importantes de acuerdo con la aplicación que se le quiera dar.

Se determinaron los probables bancos de agregado grueso con los que se podría contar sin ninguna dificultad en su adquisición de forma comercial, teniendo al respecto piedra triturada de caliza, basalto y grava andesita.

Con el agregado fino se escogió de los diferentes bancos el que garantizara mejores condiciones de limpieza en cuanto a materiales contaminantes, teniendo en cuenta que los investigadores no le dan gran importancia a este agregado en relación con su granulometría. Esto último tiene relación con que los concretos de alta resistencia contienen un alto volumen de cementantes finos, lo cual hace que la graduación de la arena usada sea relativamente insignificante comparada con el concreto convencional.



Como aditivo mineral finamente dividido se selecciona la microsíllica, material que encontramos disponible en forma factible en el mercado en comparación, por ejemplo, con las cenizas volantes que también proporcionan resistencias mayores a los concretos, sin embargo, su disponibilidad de adquisición es de mayor dificultad, por el lugar geográfico donde se pueden conseguir y, por ende, del costo y tiempo que ésto nos ocasionaría.

Los aditivos químicos fueron los menos problemáticos dado que existen en el país diferentes fabricantes y varios tipos, en este caso se adquirieron los que en apariencia, analizando las ventajas que presenta el distribuidor en sus hojas técnicas, eran los mejores para el objetivo que se perseguía. Por lo general fueron aditivos reductores de agua de alto rango. El efecto principal era poder conservar la baja relación agua/cemento en el concreto.

Con relación al agua que se utilizó, fue el agua potable disponible en los laboratorios del Área de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana de la Unidad Azcapotzalco. Además, no se debe olvidar que:

Cuando se dosifica concreto que contiene materiales cementantes agregados por separado tales como cenizas volantes, puzolanas naturales, humo de sílice y escorias de alto horno finamente molidas, se deben considerar ciertos factores. Éstos incluyen:

- a.- La actividad química del material cementante y su efecto en la resistencia del concreto a varias edades.
- b.- Su efecto en la demanda de agua de mezclado necesaria para su trabajabilidad y colocación.
- c.- La densidad (o peso específico) del material y su efecto en el volumen de concreto producido en la mezcla.
- d.- Su influencia en las dosis de aditivos químicos y/o aditivos inclusores de aire empleados en la mezcla.
- e.- El efecto de la combinación de materiales sobre otras propiedades críticas del concreto, como tiempo de fraguado bajo condiciones de temperatura ambiente, calor de hidratación, velocidad de desarrollo de resistencia y durabilidad.
- f.- La cantidad de materiales cementantes y cemento necesario para satisfacer los requisitos de un concreto en particular.

Tabla tomada del ACI 211.1<sup>42</sup>

---

<sup>42</sup> "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. op. cit., pág. 17 y 18.

## 4.2.- Programa

El principal propósito de este programa experimental es que a partir de la información con la que se cuenta, proporcionamientos de mezclas de diferentes investigadores e incluso de reportes de construcciones en las que se emplean este tipo de concretos, así como los factores que pueden intervenir en forma significativa en la adquisición de resistencia, se buscara un procedimiento para encontrar mayores resistencias en el concreto, superiores a las que normalmente se emplean en la Industria de la Construcción en México, por lo que para lograrlo se procedió de la siguiente forma:

Se trata en un principio de poder emplear en la elaboración de las mezclas, diferentes marcas de cemento, aditivos químicos superfluidificantes o reductores de agua o superplastificantes y como aditivo mineral la microsilica. Y para la fabricación de concreto, de ser posible, distintos tipos de agregados gruesos, no así con los agregados finos que será del mismo banco con el que se inicien las pruebas.

Con la información previa se generó la necesidad de ver cómo se comportan los diferentes cementos, con relación a su resistencia, primero en forma individual para poder determinar cual dará mayores ventajas respecto al objetivo de la investigación y, posteriormente, se considera que existe la posibilidad de variación, con los diferentes aditivos químicos seleccionados. Para ambos casos se emplea la norma NOM - C - 61<sup>43</sup> (ASTM - C - 109)<sup>44</sup> que es la indicada para la determinación de resistencia de los morteros. Es necesario realizar variaciones; por ejemplo, utilizar la arena como llegó del banco, lavarla y usar diferentes marcas y tipos de aditivo químico y diferentes marcas de cementos.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>43</sup> "Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos" (NOM-C-61-1976). México, 1976.

<sup>44</sup> "Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" (Using 2-in. or (50-mm) Cube Specimens), (ASTM - C - 109). Annual Book of ASTM., vol. 04. 02. 1996. págs. 68 a 72.

Una vez establecido el tipo (marca) de cemento con el mejor comportamiento, se efectuó otra prueba para determinar su comportamiento con diferentes cantidades de aditivo mineral, específicamente con la microsilica, primero ambos cementantes y, posteriormente éstos en forma conjunta con el aditivo químico, se efectuaron variaciones de la cantidad de este último.

Realizados los estudios anteriores, cuyos resultados se utilizarán posteriormente en las mezclas de concreto, se procedió a determinar las características del agregado grueso (caliza), previamente se tenía el de la arena (andesita) utilizada en los morteros.

Paralelamente a estos trabajos fue conveniente conocer las características químicas del cemento y de los aditivos que se usarían en las mezclas. Se recabó información, que se les solicitó a los fabricantes de los cementos y a los proveedores de los aditivos. Adicionalmente se hizo un análisis químico, superficial, a estos materiales.

Para el mezclado del concreto se empleó el equipo disponible de los laboratorios, como la utilización de una mezcladora de un saco de cemento, la cual no cuenta con algún sistema de control para poder regular la velocidad de mezclado que fuera necesaria para la fabricación de concretos de alta resistencia, las probetas de ensayo son los cilindros de 30" X 15", y para la compactación del concreto se empleó una varilla de compactación, varilla recta metálica de sección transversal circular de 15.9 mm de diámetro con una longitud aproximadamente de 60 cm con una punta en forma de hemisferio de 15.9 mm de diámetro, así como una mesa vibratoria para laboratorio, con una frecuencia de 3000 rpm y una amplitud de 0.5 mm, para el curado de las probetas se considera el "cuarto de curado" del propio laboratorio de construcción ( $23^{\circ} \text{C} \pm 2$  y 95% de humedad relativa), y una máquina universal con una capacidad de 200 toneladas para el ensayo de las probetas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Una vez obtenida la información de los materiales y del equipo que se utilizará en las mezclas de concreto, se procedió a establecer cuál sería la dosificación de las mismas. Para ello fue necesario tener en cuenta que la dosificación del concreto se debe basar en los datos que se obtienen de pruebas o en la experiencia adquirida con los materiales que de hecho serían empleados. Cuando estos antecedentes sean limitados o no estén disponibles, se pueden aplicar los valores estimados que se presentan en la práctica. Sin lugar a dudas, las proporciones de los materiales del concreto se deben seleccionar para facilitar la colocación, con la densidad, resistencia y durabilidad necesarias para determinada aplicación.

Por lo anterior se consideró importante conocer con qué experiencias se contaba, teniendo en cuenta únicamente los materiales que se emplearían, en el proporcionamiento de las mezclas de concretos de alta resistencia; para seleccionar y efectuar previamente una mezcla de "prueba" con la dosificación indicada. Por ello se determinó que es conveniente ilustrar en primer término estas dosificaciones, pero en un capítulo especial y haciendo notar algunos aspectos relevantes.

Dependiendo de los resultados que se obtuvieran de la mezcla de "prueba" se procedería a seguir trabajando con ella o se propondría alternativamente otra dosificación, de la que se obtendrían mejores resultados. Se variarían algunos factores como: tener un riguroso control de su granulometría, lavar el agregado grueso y variar las cantidades de aditivos, así como las proporciones entre ellos y el momento de su aplicación en el proceso de mezclado de estos últimos.

Por último, se considera la posibilidad de que el azufre, material utilizado en los ensayos de compresión del concreto normal, por sí solo no resistirá las cargas axiales a las que estaría expuesto el concreto de alta resistencia, por lo cual se previó mezclarlo con otro material, por ejemplo, arena, microsíllica u otro material, que le aumentara la resistencia para este efecto.

# **CAPÍTULO 5**

## **MEZCLAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**



## CAPÍTULO 5. Mezclas de concreto de alta resistencia.

### 5.1. Importancia de los aditivos minerales y químicos.

Indudablemente es necesaria la experimentación propia en cualquier aspecto relacionado con los concretos de alta resistencia, sin embargo, el estudio de la experiencia de otros debe permitir el establecimiento de conclusiones que apoyen los trabajos realizados.

Se considera como aditivo mineral el humo de sílice (polvo de sílice, humo de sílice condensado o precompactado, micra sílice o microsíllica)<sup>45</sup>, ya se mencionó en capítulos anteriores, que este material se ha usado con éxito en la producción de concretos de alta resistencia, reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia a los agentes químicos. El empleo de los diferentes porcentajes del humo de sílice ocasiona que el concreto tenga diferente trabajabilidad, por lo que la demanda de agua aumenta conforme se incrementan las cantidades de este material.

Los humos de sílice son un subproducto resultante de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón y astillas de madera, en un horno de arco eléctrico, durante la producción de metales de sílice o aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice, que se condensa a partir de los gases que escapan de los hornos, tienen un alto contenido de dióxido de sílice amorfa y consiste en partículas esféricas muy finas<sup>46</sup>.

La finura de la microsíllica medida por el método de la Porosimetría Intrusiva de Mercurio, es según Olek y otros, del orden de  $20.76 \text{ m}^2/\text{g}$ <sup>47</sup> en su estado denso. Howard y otros investigadores afirman que la superficie específica de ésta es de  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ <sup>48</sup> por lo que es mayor que la del cemento. Su peso específico es de aproximadamente de  $2.2 \text{ kg}/\text{dm}^3$ <sup>49</sup>. Este peso es bajo en comparación con el del cemento Portland, lo que implica que cuando se efectúa un reemplazo en peso

<sup>45</sup> Cfr. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ... op. cit, pág. 17

<sup>46</sup> Ibid. pág. 16

<sup>47</sup> Cfr. OLEK, JAN et. al. "Determination of Surface Area of Portland Cement and Silica Fume by Mercury Intrusion Porosimetry", *ACI Materials Journal*, vol. 87, núm. 5, september - october, 1990. pág. 478.

<sup>48</sup> Cfr. HOWARD, Nathan. L., and LEATHAM, David. M. "The production and Delivery of High Strength Concrete" *Concrete International*, april, 1989. pág. 29.

<sup>49</sup> Cfr. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ... op. cit, pág. 17

(masa) del cemento se tendrán que añadir mayores cantidades en volumen de humo de sílice. Por lo tanto, el volumen de cementante en la pasta se incrementa y en realidad hay una disminución de la relación agua/materiales cementantes con respecto al volumen. A continuación se ve una tabla (5.1.1.) comparativa entre el cemento y el humo de sílice:

		Modulo de finura m <sup>2</sup> /g	Peso específico Kg/dm <sup>3</sup>
Investigadores	Humo de sílice	20.00 – 20.76	2.2
Inv. Cementos y lab.	Cemento	0.30 – 0.436	3.1

Tabla 5.1.1.<sup>50</sup>

La extrema finura (0,1µm de  $\phi$ ) y el alto contenido de sílice, de este aditivo mineral, hacen que reaccione efectivamente como un material puzolánico con la cal "libre" que se produce durante la hidratación del cemento, a fin de formar el compuesto cementante estable llamado hidrato de silicato de calcio<sup>51</sup>.

Como se indicó anteriormente se disminuye la trabajabilidad del concreto, por lo que siempre será preferible usar un aditivo químico como son aquellos que nos pueden dar un incremento en el revenimiento de nuestro concreto, suena lógico que la dosis empleada dependerá del porcentaje empleado del aditivo mineral y de los efectos deseados.

Algunos investigadores recomiendan emplear directamente aditivos reductores de alto rango, mencionan que se obtienen los máximos beneficios en el mezclado con la microsíllica ya que mejora la fluidez y reduce el contenido de agua satisfactoriamente se han mencionado especialmente aquéllos que están fabricados ha base de naftalina y tienen su peso molecular dentro de cierto rango y se puede observar las diferencias de los efectos de la relación  $w/(c+SF)$ ,

<sup>50</sup> Elaboración propia en base a la información de los artículos de Olek Jan, Howard Nathan, el libro del ACI y la proporcionada por los fabricantes de Cementos.

<sup>51</sup> Cfr. "State of the Art Report... op. cit. pág. 5

evidentemente la efectividad depende del momento de la adición del aditivo, notándose en la fluidez y resistencia del concreto<sup>52</sup>.

La tabla 5.1.2 muestra los beneficios del momento de la adición del aditivo reductor de alto rango<sup>53</sup>, y se visualiza mejor en la gráfica 5.1.1.

w/(c + SF)	1porcentaje s/s HRWRA Tipo de adición	Fluidez, %	Aire, %	Esfuerzo de Compresión M Pa	
				14 días	28 días
0.45	Adicionado <sup>a</sup>	140	1.5	68.3	76.5
0.45	Separado <sup>b</sup>	>160	0.9	78.5	77.0
0.45	Diferido <sup>c</sup>	>160	1.0	77.4	84.0
0.40	Adicionado	116	3.1	78.3	85.5
0.40	Separado **	160	2.3	87.0	86.2
0.40	Diferido ***	>160	1.0	87.9	91.0
0.35	Adicionado	85	5.0	89.7	89.1

Tabla 5.1.2. – Morteros con 15 % de microsilica en substitución por peso de cemento con diferentes técnicas de adición de HRWRA, reportada por Rosenberg y Gaidis.

Artículos especializados señalan que se ha desarrollado un nuevo aditivo líquido (con microsilica) para mejorar el esfuerzo en el concreto que, además de los efectos benéficos de manipulación y mezclado del concreto, tiene la reducción del costo en el envío de remesas y la eliminación del riesgo del polvo tan fino de la microsilica.

Este aditivo es un producto en el que se ve la microsilica dispersa en agua con aditivos apropiados que le proporcionan mejoras de estabilidad y propiedades de viscosidad. Algunas de estas propiedades están descritas en la tabla 5.1.3.

<sup>52</sup> Cfr. ROSENBERG A.,M., and GAIDIS J., M., "A New Mineral Admixture for High Strength Concrete", *Concrete International*, april, 1989. pág. 31.

<sup>53</sup> Ibid., pág. 32

<sup>a</sup> Adicionado. – El HRWRA mezclado con el agua.

<sup>b</sup> Separado. – Una parte del HRWRA mezclado con el agua y la otra posteriormente

<sup>c</sup> Diferido. – El HRWRA adicionado al final de acuerdo como lo marca la Norma ASTM – C – 305 y mezclado adicionalmente 1 minuto.

NOTA. – El cemento usado es el Tipo I. El mortero se elaboró usando arena para concreto previo cumplimiento de la norma ASTM – C – 33. La relación arena/(cemento + SF) fue de 2.0. La fluidez y el contenido de aire se determinaron de acuerdo a ASTM – C – 185. El esfuerzo de compresión se obtuvo usando cubos de 50mm.

Contenido de sólidos de microsilica	> 92% por peso
Viscosidad* a 25° C	1000 CP a 0.6 r.p.m. 200 CP a 60 r.p.m.

Tabla 5.1.3. – Propiedades del nuevo aditivo<sup>54</sup> líquido para altos esfuerzos.

Los cambios en las proporciones de los componentes de la mezcla pueden, sin duda, repercutir en un alto o bajo esfuerzo, sin embargo, los efectos (tabla 5.1.4)<sup>55</sup> de este nuevo aditivo no muestran la sensibilidad del uso de las diferentes marcas de cemento.

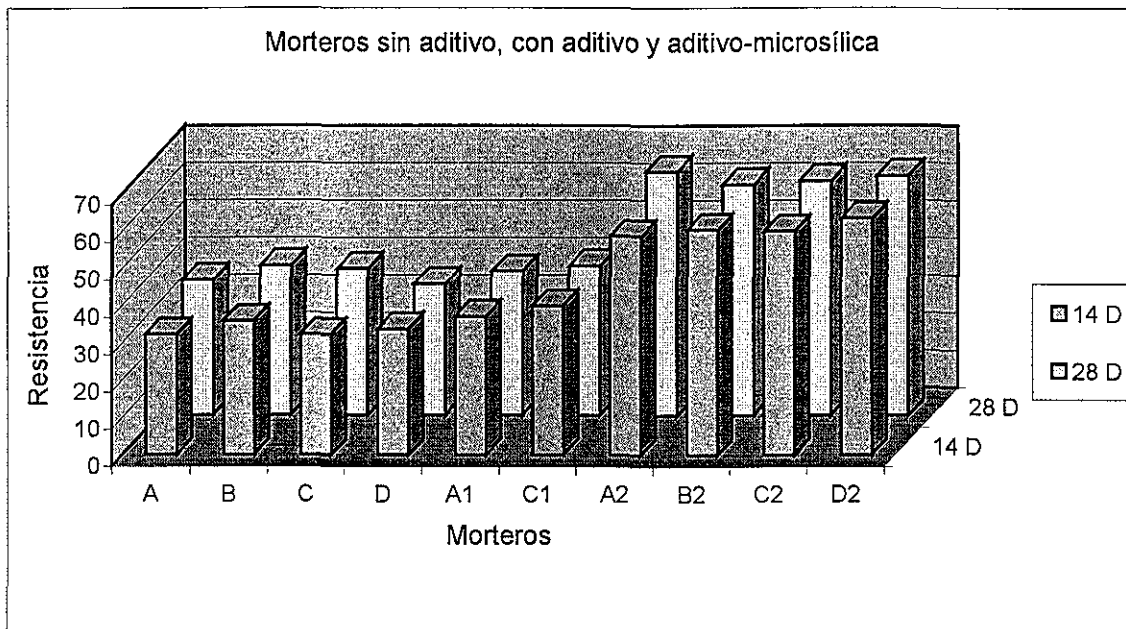
Marca de cemento	% s/s WRDA19	% adición microsilica	w/(c +SF)	% fluidez	% aire	Esfuerzo de Compresión MPa	
						14 días	28 días
A			0.6	83	3.3	32.4	36.2
B			0.6	52	3.3	35.9	40.0
C			0.6	79	1.7	32.4	39.3
D			0.6	60	4.3	33.8	35.2
A	1.0		0.45	18	9.3	37.2	38.6
C	1.0		0.45	18	6.4	40.0	40.0
A	1.0	10.0	0.45	93	5.0	58.6	65.2
B	1.0	10.0	0.45	41	4.9	60.3	61.7
C	1.0	10.0	0.45	81	5.9	60.0	62.7
D	1.0	10.0	0.45	50	5.8	63.4	64.1

Tabla 5.1.4. – Resultados de los esfuerzos morteros usando 10% de microsilica en peso y diferentes marcas de cements.

\* Viscosidad típica medida con un Viscosímetro Brookfield LVT con un areómetro # 3 y usando una muestra bien mezclada

<sup>54</sup> ROSENBERG, A. M. op. cit., pág. 31.

<sup>55</sup> Ibid. pág. 32.



Gráfica 5.1.1. – Resistencia de morteros a los 14 y 28 días sin aditivos, con aditivo y aditivo – microsíllica<sup>56</sup>.

Es conveniente mencionar que este último aditivo, que reduce prácticamente los riesgos del uso de la microsíllica, por la finura de sus partículas, no está disponible comercialmente en forma práctica en el mercado nacional.

## 5.2. Dosificaciones de concreto de alta resistencia.

Como se mencionó en el capítulo anterior es importante revisar si se dispone de alguna información con relación a dosificaciones de concretos de alta resistencia, independientemente de la metodología empleada para el mezclado, pero teniendo como requisito que contengan los materiales que se utilizarán en el mezclado, porque es importante conocer los resultados de experiencias previas. Aun cuando son composiciones empleadas en diferentes países y, por consiguiente también, los cementos, áridos, aditivos químicos y minerales empleados son muy diferentes, al respecto se encontró lo siguiente:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>56</sup> Elaboración propia en base a los resultados reportados por Rosenberg A. M. y Gaidis J. M.

Las tablas (5.2.1. y 5.2.2.)<sup>57</sup> fueron obtenidas de un artículo (PIGEON Michel, GAGNÉ Richard et. al.) donde esencialmente se enfocaban a determinar, para ciertos tipos de cemento, el valor límite de la relación agua/cemento, a la vez, de la resistencia de los ciclos (congelamiento deshielo), y de la resistencia de descarapelarse por presencia de sales que atacan el gel.

Tipo de concreto	$\frac{A}{C+FS}$	Tipo de agregado grueso	Tipo de cemento MPa	Cemento kg/m <sup>3</sup>	FSk gm <sup>3</sup>	SP (ml/kg de cementante)	AEA (ml/kg de cementante)	Revenimiento (mm)	Contenido de aire (%)	Resistencia a la compresión (MPa)
1	0,30	Calcaría dolomítica	30	450	27	28	0-2	45-90	2,8-4,9	78-87
2	0,30	Calcaría dolomítica	30	460	0	33	0-2,5	40-160	2,8-11	60-80
3	0,30	Calcaría dolomítica	10	442	27	26	0-0,7	175-210	4,8-7,8	65-75
4	0,30	Grava de granito	30	424	25	31	0-1,9	150-230	3,4-9,2	70-89
5	0,26	Calcaría dolomítica	30	545	32	38	0-2	75-130	2,6-4,9	86-93
6	0,26	Calcaría dolomítica	10	543	33	24	0	60	2,8	82
7	0,23	Calcaría dolomítica	30	645	38	52	0-3	30-55	2,5-3,9	91-97

Tabla 5.2.1. – Materiales y resistencias que reportan PIGEON Michel, GAGNÉ Richard et. al.

CEMENTO		
	TIPO 10	TIPO 30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,3	1,8
SO <sub>3</sub>	2,1	2,9
CaO	62,4	64,2
SiO <sub>2</sub>	21,5	20,9
MgO	2,9	2,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,6	4,1
Alcalins (en Na <sub>2</sub> O, %)	0,80	0,71
Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	340	545
C <sub>3</sub> S	51	63
C <sub>2</sub> S	23	12
C <sub>3</sub> A	8	8
C <sub>4</sub> AF	7	5

Tabla 5.2.2. – Contenidos químicos de los dos tipos de cemento, PIGEON.

<sup>57</sup> PIGEON, Michel., et al., "La durabilité au gel des bétons a haute performance". *Can. Civ. Eng. vol. 19. 1992. págs. 977 y 976.*

También se encontró que en Alemania el concreto de alta resistencia fue usado por primera vez en la nueva oficina administrativa principal de BfG en Frankfurt. Kern E., reporta la composición de concreto que fue usado y está mostrado en la tabla 5.2.3<sup>58</sup>.

Cemento PZ 45 Dyckerhoff	450 Kg/m <sup>3</sup>
Microsílica en suspensión Elkem (% microsíllica 35 Kg/m <sup>3</sup> )	70 Kg/m <sup>3</sup>
Arena principal 0/2	610 Kg/m <sup>3</sup>
Grava Rhine 2/16	1140 Kg/m <sup>3</sup>
Contenido de agua	150 l/m <sup>3</sup>
Aditivo FM62 Addiment	12 l/m <sup>3</sup>
Retardante VZ4 Addiment	
Relación agua/cemento	< 0.35
Consistencia	Fluido

Tabla 5.2.3. – Concreto empleado en la nueva oficina administrativa principal de BfG en Frankfurt.

El contenido de microsíllica aquí fue  $35/450=7.7\%$  peso del cemento. La fuerza o resistencia llevada a cabo fue en promedio, 112 MPa, la cual fue substancialmente grande que la calidad esperada B85. La resistencia después de 24 horas fue alrededor de 50-65 MPa. Held M, mostró que la resistencia de concreto (tabla 5.2.4) usando agregados glaciales del río Rhine todavía, puede ser aumentada a 135 MPa, con una mezcla conveniente seleccionada, cemento y microsíllica y una reducción de la relación agua/cemento<sup>59</sup>.

Cemento PZ-45	450 Kg/m <sup>3</sup>
Microsílica	45 Kg/m <sup>3</sup>
Agregado	
0/2	661 Kg/m <sup>3</sup>
2/8	358 Kg/m <sup>3</sup>
8/16	768 Kg/m <sup>3</sup>
Agua	128 l/m <sup>3</sup>
Aditivo	22.5 l/m <sup>3</sup>
Retardante	1.8 l/m <sup>3</sup>
Relación agua/cemento (no con respecto a los aditivos)	0.23
Producir valores de concreto fresco a 10/a45	58/49 cm

Tabla 5.2.4. - La mezcla usada tuvo un esfuerzo, llevado a cabo en los cubos, en promedio de 135 N/mm<sup>2</sup>

<sup>58</sup> WALRAVEN, J. C., "High Strength Concrete Production". *Concrete Precasting Plant and Technology*. ISSUE 2/1992. pág. 71.

<sup>59</sup> Ibid., pág. 71.

Es importante indicar las consideraciones que se tuvieron en cuenta para obtener las altas resistencias de los cubos, mostradas anteriormente, la primera es que pueden ser obtenidas por la elección de una conveniente composición de ingredientes, y la segunda nos indica que esas resistencias tienen que ser corregidas para designar valores. Para designar los valores, con los esfuerzos de los cubos, puede ser expresada como:

$$f_{cd} = C_1 C_2 C_3 f_{cck} / \gamma_c$$

Donde

$C_1$  = factor de conversión del cubo – a esfuerzo del cilindro

$C_2$  = factor sostenido de peso

$C_3$  = factor conversión de campo – a calidad del laboratorio

$\gamma_c$  = factor de seguridad del material

El factor de seguridad del material es conocido y es más usual encontrarlo en las normas internacionales.

En la Universidad Tecnológica de Delft se han realizado pruebas para determinar los factores  $C_1$  y  $C_2$ . Las pruebas del modelo se llevaron a cabo por Mebin Amsterdam y llevadas a Delft. La composición de la mezcla está representada en la tabla 5.2.5<sup>60</sup>.

Cemento PZ 55	475 Kg/m <sup>3</sup>
Microsílica (Elkem)	25 Kg/m <sup>3</sup>
W/(c+s)	0.30
Arena 0-5	825 Kg/m <sup>3</sup>
Grava triturada 4-16	930 Kg/m <sup>3</sup>
Sulfonato de naftalina	4 Kg/m <sup>3</sup>
Lignosulfonato	1 Kg/m <sup>3</sup>
Revenimiento/valor de producción (10min)	11/42 cm

Tabla 5.2.5. - Composición de la mezcla utilizada en la Universidad Tecnológica de Delft.

<sup>60</sup> Ibid., pág. 72.



A los 28 días la resistencia del concreto fue ensayada en 6 cubos ( $150 \text{ mm}^3$ ) y 6 prismas ( $100^2 \times 300 \text{ mm}$ ). La resistencia de los cubos fue encontrada, en valores promedio,  $f_{cc, 15} = 119.3 \text{ MPa}$ , con una desviación estándar de  $\sigma = 2.4 \text{ MPa}$ , esta pequeña desviación, significa que el grado de concreto es cerca de B115. Para la resistencia de los prismas se encontraron valores promedio de  $f_{cp} = 95.5 \text{ MPa}$ .

Calculando de nuevo a la medida de los cubos alemanes de  $200 \text{ mm}^3$ , los valores en promedio de  $f_{cc, 20} = f_{cc, 15} / 1.04 = 119.3 / 1.04 = 114.7 \text{ MPa}$  son los encontrados. La resistencia de la relación prisma/cubo es por lo tanto  $f_{cp} / f_{cc} = 95.5 / 114.3 = 0.83$ . Además un número de prismas trajeron fallas bajo varios porcentajes de resistencia.

Las pruebas fueron llevadas a cabo en una deformación controlada para verificar el proceso de compresión, sin embargo, no el longitudinal, pero la deformación transversal fue elegida como un parámetro de control.

Para la primera aplicación de concreto de alta resistencia en Alemania, en la oficina de BIG en Frankfurt, los valores  $C_1$ - $C_3$  fueron elegidos como  $C_1 = 0.85$ ,  $C_2 = 0.85$  y  $C_3 = 0.95 (1 - f_{cck} / 600) f_{cc}$  (Hegger J.).

Las pruebas conducidas para  $C_1$  y  $C_2$  confirman a primera vista la elección. Para  $C_3$ , sin embargo, estas pruebas con pequeñas proporciones de carga son necesarias<sup>61</sup>.

De igual manera encontramos que, Pierre – Claude Aitcin, reportan las siguientes proporciones de ingredientes para concretos de alta resistencia. Tabla 5.2.6 y tabla 5.2.7.

---

<sup>61</sup> Ibid., pág. 72.

MATERIAL	CANTIDAD
Agua	135 L/m <sup>3</sup>
Cemento Tipo I	500 kg/m <sup>3</sup>
Microsilica	30 kg/m <sup>3</sup>
Relación A/(C+ CSF)	0.25
Agregado grueso	1100 kg/m <sup>3</sup>
Arena	700 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	14 L/m <sup>3</sup>
Retardador	1.8 L/m <sup>3</sup>

Edad días	Resistencia MPa
1	50.2
7	72.7
28	87.0
91	100.2

Tabla 5.2.6. - Dosificación y resistencias de concreto, columnas de un edificio, Montreal 1984<sup>62</sup>.

MATERIAL	CANTIDAD
Agua	130 kg/m <sup>3</sup>
Cemento Tipo I	535 kg/m <sup>3</sup>
Microsilica	42 kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso	1200 kg/m <sup>3</sup>
Arena	610 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	Desconocido
Retardador	Desconocido

Edad días	Resistencia MPa
7	75.9
28	124.0
56	139.9
91	151.7

Tabla 5.2.7. – Dosificación y resistencias de concreto, grava glaciar de Seattle, Washington (Estados Unidos), resultados personales<sup>63</sup>.

<sup>62</sup> AITCIN, Pierre C., et al. "Development and Experimental Use of a 90 MPa (13,000 psi) Field Concrete", *ACI SP-87-5*, pág. 61.

<sup>63</sup> AITCIN, P, C, "Concretos de muy Alta Resistencia", op. cit. pág. 13.

También se encontró en un artículo escrito por de Larrard F. y Le Roy R. una serie de mezclas donde se tenía el empleo de microsíllica en el diseño de las dosificaciones como se ilustran en la Tabla 5.2.8.

Materiales kg/m3	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>
Agregado normal	1200	1216	1239	1172	1136	1204	1200	1202	1200	1200	1200
Arena	670	669	679	643	623	660	658	659	658	658	658
Cemento	342	398	366	422	457	355	429	373	426	412	386
Microsíllica	0	39.8	36.6	42.2	45.7	35.5	42.9	37.3	0	20.6	57.9
Superplastificante*	0	19.3	17.8	20.5	22.2	17.2	20.1	18.1	20.7	20.0	18.8
Adición de agua	171	118	108	125	136	137	106	129	126	122	114
Densidad	2.36	2.43	2.45	2.42	2.42	2.41	2.43	2.41	2.43	2.43	2.43
Aire atrapado	1.9	0.6	1.2	0.7	0.4	0.7	0.9	0.5	1.2	0.8	0.6
Revenimiento (mm)	60	200	180	220	250	220	-----	220	200	-----	-----
Rel. de agregados	0.705	0.714	0.731	0.687	0.675	0.712	0.711	0.715	0.708	0.712	0.714
W/c	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	0.42	0.28	0.38	0.33	0.33	0.33
S/c	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.05	0.15
Esf. de compresión MPa											
Fc <sub>1</sub>	11.4	25.4	26.8	22.2	31.3	20.6	34.2	14.3	25.4	25.5	28.8
Fc <sub>3</sub>	25.4	51.5	49.7	48.1	49.1	35.6	53.7	37.8	38.2	42.8	42.6
Fc <sub>7</sub>	32.0	70.7	69.1	69.5	70.3	56.6	75.6	57.8	57.2	64.5	67.0
Fc <sub>28</sub>	43.5	92.1	94.3	93.3	99.4	74.6	97.3	79.5	67.2	74.6	94.3

Tabla 5.2.8. - Dosificación y resistencias de concreto reportadas por de Larrard F. y Le Roy R<sup>64</sup>.

Se consideró conveniente transcribir dos Diseños de mezcla (Tablas 5.2.9 y 5.2.10.) proporcionados por Master Builders Inc., por ser diseños reales que se encuentran en una obra.

MATERIAL	CANTIDAD
Cemento tipo I	326.31 kg/m <sup>3</sup>
Microsíllica 9%	29.66 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	425 g/45.36 kg.
Aditivo tipo "A"	284 g/45.36 kg.
Relación agua/cemento + SF	0.38
Revenimiento	19.68 cm
Contenido de aire	4.3 %
Esfuerzo de compresión a los 7 días	45 MPa
Esfuerzo de compresión a los 28 días	68 MPa
Permeabilidad a la penetración de cloruros (coulombs)	(promedio)

Tabla 5.2.9. - Diseño de mezcla de concreto utilizado en Oak Ridge Waste Management Facility<sup>65</sup>.

<sup>64</sup> DE LARRARD, F., and LE ROY, F. "The Influence of Mix Composition on the Mechanical Properties of Silica Fume High Performance Concrete", *Fourth International ACI CANMET Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. 1992. Istanbul.

<sup>65</sup> Cfr. "High Performance Concrete Meets Stringent Requirements", *Concrete Construction*. mayo. 1992. pág. 372.

MATERIAL	CANTIDAD
Cemento tipo I	444.96 kg/m <sup>3</sup>
Microsílica 22%	97.89 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	850–992 g/45.36 kg.
Reductor de agua/Retardador	113 g/45.36 kg.
Relación agua/cemento + SF	0.31
Revenimiento (mínimo)	25.4 cm
Contenido de aire	5 + 2 %
Esfuerzo de compresión a las 24 horas	31 MPa
Esfuerzo de compresión a los 7 días	57 MPa
Esfuerzo de compresión a los 28 días	77 MPa
Permeabilidad a la penetración de cloruros (coulombs) a los 42 días.	115

Tabla 5.2.10. – Diseño de mezcla de concreto utilizado en Federal Paper Plant.<sup>66</sup>

Por último se ilustra un diseño de mezcla, Tabla 5.2.11, donde únicamente se empleó como aditivo la microsíllica, se utilizó en Glomar Beaufort Sea I Drilling Platform y lo reporta R. W. LaFraugh.

MATERIAL	CANTIDAD
Cemento tipo I	459.80 kg/m <sup>3</sup>
Microsílica	27.29 kg/m <sup>3</sup>
Relación agua/cemento + SF	0.32
Arena/agregado	0.40
Revenimiento (mínimo)	17.8-22.9 cm
Peso unitario	5 + 2 %
Esfuerzo de compresión a los 7 días	50 MPa
Esfuerzo de compresión a los 28 días	60 MPa
Esfuerzo de compresión a los 56 días	62 MPa

Tabla 5.2.11. – Diseño de mezcla para Glomar Beaufort Sea I Drilling Platform<sup>67</sup>.

Es importante señalar que en todas las mezclas presentadas anteriormente no se cuenta con la información suficiente, por ejemplo; superplastificante utilizado, tipo

<sup>66</sup> Cfr. Ibid., pág. 372.

<sup>67</sup> Cfr. Ibid.

y calidad del agregado grueso y fino, tamaño nominal del agregado grueso, módulo de finura del agregado fino, etc., para tratar de establecer una relación con los materiales existentes en la zona metropolitana de la ciudad de México, y con ello poder utilizarlos y así plantear un proyecto de dosificación que sea apropiado. Por otra parte, los documentos revisados no mencionan ninguna técnica específica, ni metodología empleada para el proceso de mezclado de los ingredientes. Sin embargo, se propuso un diseño para dar inicio a la investigación que nos ocupa.

# **CAPÍTULO 6**

## **RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS MATERIALES**

## CAPÍTULO 6. Resultados de los análisis de los materiales.

### 6.1. Cementos.

En el proyecto de investigación se consideró el empleo de diferentes marcas de cemento del tipo Portland I ó II, comercialmente accesibles en la zona metropolitana, con el fin de determinar cual es el de mejores características con relación a su comportamiento mecánico.

Se ha mencionado en capítulos anteriores que algunos investigadores recomiendan cementos con módulos de finura elevados y composiciones químicas específicas. Y en forma general se mencionan dos características que los cementos deben tener, la primera consiste en que debe desarrollar los esfuerzos apropiados, y la segunda menciona que debe mostrar su particular comportamiento reológico.

De acuerdo a lo anterior, se consideró necesario conocer la composición de las características químicas de los cementos disponibles para trabajar, en la tabla 6.1.1, se incluye la información técnica proporcionada por los fabricantes para las tres marcas de cemento empleadas; así como, los límites que establecen las normas oficiales mexicanas:

Componentes	Cemento A	Cemento B	Cemento C	Norma
% SiO <sub>2</sub>	15.60	27.58	29.10	
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.12	6.60	6.50	
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.26	2.69	3.10	
% CaO	55.00	53.82	52.40	
% MgO	1.20	1.76	1.30	Máximo 5
% SO <sub>3</sub>	2.48	3.52	3.10	Máximo 5
% K <sub>2</sub> O	1.18		1.30	
% Na <sub>2</sub> O	0.72	2.06	0.90	
% CaO libre	0.30	0.52	0.80	
% P.ing	1.90	2.31	2.50	Máximo 8
% R.ins.	11.62	18.70	15.80	
Blaine cm <sup>2</sup> /gr	4050	4360	4153	Mínimo 3000
Fraguado Inicial.	143 min.	157 min.	127 min	No menos de 45 minutos.
Fraguado Final.	5:17 hrs: min	4:47 hrs: min	4:31 hrs: min	No más de 7 Horas.

Tabla 6.1.1. – Datos técnicos presentados por los fabricantes de los cementos<sup>68</sup>.

<sup>68</sup> Elaboración propia con los datos proporcionados por los fabricantes de cemento y con apoyo de las Normas Oficiales Mexicanas NOM-C-1 y NOM-C-2.

Paralelamente a la obtención de la información se analizaron, en los laboratorios del Área de Química Aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana, mediante un análisis químico elemental realizado por Absorción Atómica las muestras de los cementos con los que se realizarían las primeras mezclas de prueba, los resultados se presentan en la tabla 6.1.2:

Componentes	Cemento A	Cemento B	Cemento C
Si, % como SiO <sub>2</sub>	50.48	58.18	48.52
Ca, % como CaO	0.59	1.52	1.25
Mg, % como MgO	0.12	0.129	0.155
Na, % como Na <sub>2</sub> O	0.05	0.073	0.04
Fe, % como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.947	1.671	1.009

Tabla 6.1.2. – Análisis químico elemental de los cementos<sup>69</sup>

Se menciona que la mayor parte de los cementos tipo I ahora usados para producir altas resistencias en el concreto tienen un módulo de finura (Blaine) entre los rangos de 300 a 400 m<sup>2</sup>/kg, y el cemento tipo III (alta resistencia a edades tempranas) tiene un Blaine entre 500 y 600 m<sup>2</sup>/kg<sup>70</sup>.

El módulo de finura de los cementos, presentados por los fabricantes seleccionados (tabla 6.1.1), no está dentro de los rangos usuales mencionados anteriormente, sin embargo, la finura es alta en todos los cementos lo que los hace apropiados para su utilización ya que se mencionó anteriormente que es conveniente esta condición para producir concretos de alta resistencia, así como las características químicas de los mismos, con relación a ellas los investigadores mencionan contenido importante de silicato tricálcico porque producen pastas de mayor resistencia<sup>71</sup>.

<sup>69</sup> Elaboración propia en base a los resultados proporcionados por el Laboratorio del Área de Química Aplicada de la UAM – Azcapotzalco.

<sup>70</sup> Cfr. KOSMATKA, Steven H. op. cit., pág. 73.

<sup>71</sup> Cfr. FIORATO, Anthony E. op. cit., pág. 45



Si tomamos en consideración los compuestos químicos anteriormente mencionados en forma independiente la elección del cemento sería, en primer lugar el "C", posteriormente el "B" y por último el "A", de acuerdo con la información presentada por los fabricantes. Sin embargo, de acuerdo con el estudio químico realizado la factibilidad del uso, para los fines que se persiguen sería, primero el "B", posteriormente el "A" y por último el "C".

Ante esta discrepancia de información y no queriendo entrar en detalle con la información proporcionada, decidimos efectuar las pruebas correspondientes, porque de acuerdo a algunos investigadores, hay que tener la mejor elección del cemento a utilizar, incluyendo su comportamiento con los demás ingredientes, como son los aditivos químicos y minerales, de acuerdo con las normas existentes para tal efecto<sup>72</sup>.

Se debe recordar además que, un aspecto importante, es la reología de los materiales que se utilicen en el mezclado. Entendiéndose por el término de reología la parte de la física que trata de la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y, en general, del flujo de la materia.

## 6.2. Agua.

El agua empleada para las mezclas fue tomada de las cisternas de agua potable de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Es importante mencionar que los requerimientos de la calidad del agua, para los concretos de alta resistencia, son los mismos que los empleados en concretos convencionales, en forma general se menciona que mientras el agua sea potable es apta para ser utilizada.

---

<sup>72</sup> Cfr. Blick, Ronald L., et. al. "Proportioning and Controlling High-Strength Concrete", *Proportioning Concrete Mixes, SP-46*, American Institute Detroit, 1974, págs. 143 y 144.

En principio se puede considerar que el agua, suministrada por la delegación política en la cual se encuentra ubicada la Institución, es potable. Sin embargo, se realizó un análisis, con el objeto de verificar la calidad de la misma.

En los análisis químicos efectuados (Tabla 6.2.1), se realizaron en los laboratorios de Área de Termofluidos, de la propia Universidad, teniéndose los siguientes resultados:

ANÁLISIS REALIZADO	AGUA DE LA LLAVE
PH	7.84
ALCALINIDAD (ppm)	274.03
Cl (ppm)	115
SULFATOS	315

Tabla 6.2.1. – Análisis del agua de la cisterna de los neumáticos del edificio “P” de la U.A.M. Azcapotzalco<sup>73</sup>.

De acuerdo con la Norma Mexicana NOM-C-122<sup>74</sup> (Tabla 7.2.2\*), que establece los límites de la calidad del agua que se puede emplear en la elaboración de concreto hidráulico. Podemos determinar como consecuencia que, sin tener la menor duda, el agua de la llave de los laboratorios se considera apta para usarse en la mezcla.

<sup>73</sup> Elaboración propia en base a los resultados del análisis del agua realizados por el personal del Laboratorio del Área de Termofluidos de la UAM – Azcapotzalco.

<sup>74</sup> “Agua para Concreto”, (NOM-C-122), op. cit. pág. 1

\* Notas de la tabla VIII.2.2.

- a.) Las aguas que excedan los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesio, podrán emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no excede dichos límites.
- b.) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NOM-C-88.
- c.) Cuando se use un cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de esta tabla.

IMPUREZAS	Límites en p.p.m.	
	Cementos ricos en calcio	Cementos Sulfato-resistentes
<b>SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN</b>		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (Finos de cemento y Agregados)	50000	35000
<b>CLORUROS COMO CL (a)</b>		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puentes.	400 ©	600 ©
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedo o en contacto con metales como aluminio, fierro galvanizado y otros similares.	700 ©	1000 ©
Sulfatos como SO <sub>4</sub> (a)	3000	3500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de Carbono disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3
Alcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del PH	No menor de 6	No menor de 6.5

Tabla 6.2.2. – Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas<sup>75</sup>.

### 6.3. Agregados pétreos

#### 6.3.1 Arena.

Se analizó la arena proveniente de la mina de Santa Fé, de origen andesítico, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM- C) 30<sup>76</sup>, 73<sup>77</sup>, 77<sup>78</sup>, 111<sup>79</sup>, 165<sup>80</sup> y 170<sup>81</sup>, obteniéndose los siguientes resultados:

<sup>75</sup> “Agua para Concreto”, (NOM-C-122), op. cit. pág. 6

<sup>76</sup> “Muestreo de Agregados”, (NOM- C-30), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 5-18.

<sup>77</sup> “Masa Volumétrica”, (NOM-C-73), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 19-24.

<sup>78</sup> “Análisis Granulométrico”, (NOM-C-77), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 25-29.

<sup>79</sup> “Concreto-Agregados-Especificaciones”, (NOM-C-111), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 47-63.

<sup>80</sup> “Masa Específica y Absorción de agua del agregado Fino”, (NOM-C-165), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 141-150.

<sup>81</sup> “Reducción de las Muestras de Agregados, obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas” (NOM-C-170), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 151-159.

## TABLAS CON DATOS DE LA ARENA<sup>Φ</sup>

ASTM	Retenido en peso (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
3/8"	0	0	0
4	9.5	0.8	0.8
8	112	9.9	10.7
16	272	24.0	34.7
30	605	53.4	88.1
50	104	9.2	97.3
100	19	1.7	99.0
Charola*	11.5	1.0	100.0

Modulo de Finura (M.F.) = 3.31

P <sub>esss</sub>	P <sub>es</sub>	Abs	P.V.S.	P.V.C.	M.F.
kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
2.28	2.06	10.6	1397.6	1572.88	3.3

Es conveniente puntualizar que en el análisis correspondiente no se observaron impurezas en la arena. La nomenclatura empleada se encuentra a continuación y la curva granulométrica se encuentra en la pagina siguiente.

P<sub>esss</sub> = Peso específico sat. sup. seca

P<sub>es</sub> = Peso específico seco

Abs = Absorción

M.F. = Modulo de Finura

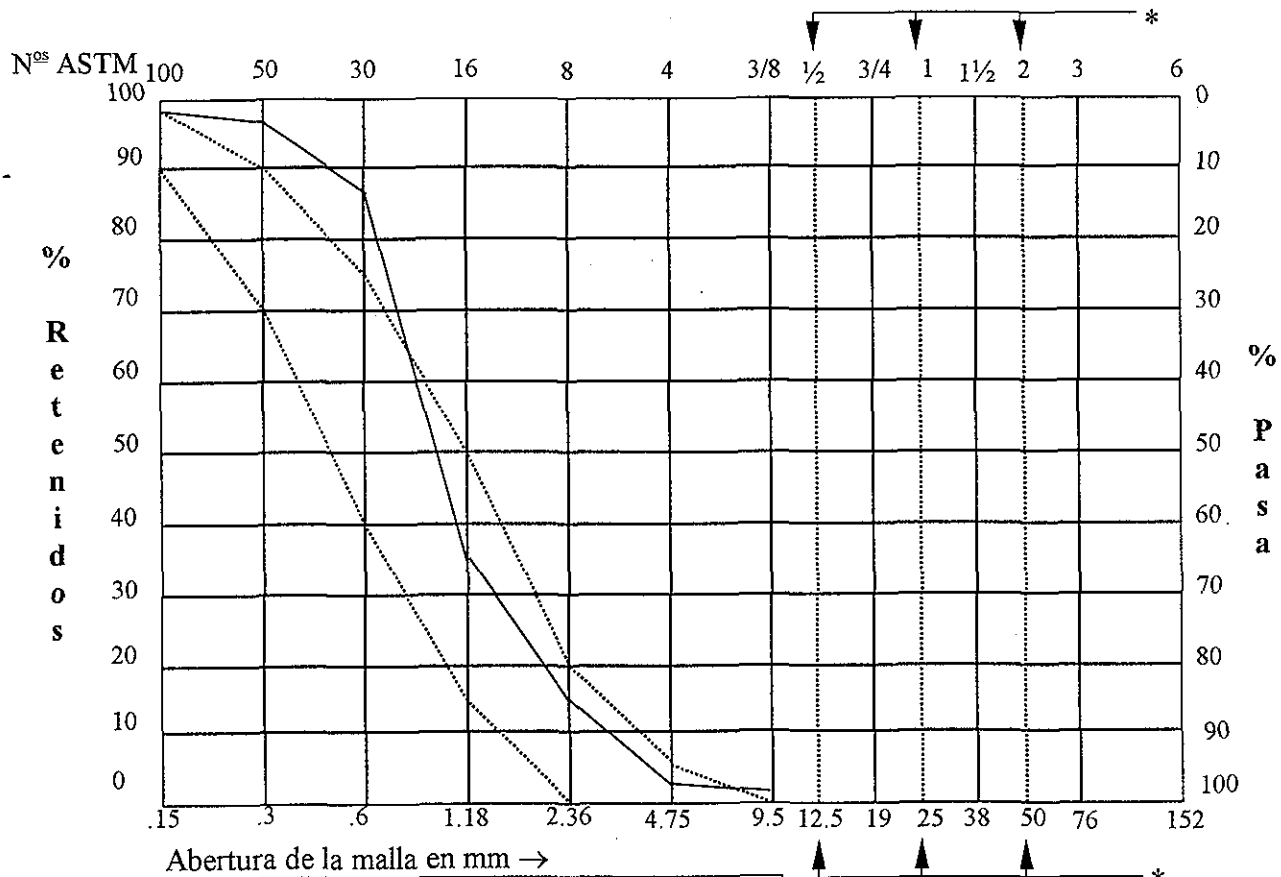
P.V.S. = Peso volumétrico suelto

P.V.C. = Peso volumétrico compacto

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

# Análisis físico de agregados - GRÁFICA GRANULOMÉTRICA<sup>Φ</sup>

Clase y procedencia ARENA ANDESÍTICA SANTAFÉ



Abertura malla mm.	Nom. ASTM	Retenido en Peso (gr)	Retenido Parcial %	Retenido acumulado %
G 76	3			
G 50	2 *			
G 38	1 ½			
G 25	1 *			
G 19	¾			
G 12.5	½ *			
G 9.5	⅜	0	0	0
G 4.75	4	9.5	0.8	0.8
M 2.36	8	112	9.9	10.7
M 1.18	16	272	24.0	34.7
M 0.6	30	605	53.4	88.1
M 0.3	50	104	9.2	97.3
M 0.15	100	19	1.7	99.0
Charola *		11.5	1.0	100
Total		1133	100	330.6

Peso muestra kg.	1.133
Tamaño nominal	
Modulo de finura	3.31
Densidad S.S.S.	
Absorción %	
Humedad %	
Peso Vol. Seco Suelto	
Peso Vol. Seco Comp.	
Material suave %	
Terrones %	
Materia orgánica	
Pérdida por lavado %	
Densidad seca	

\* Fuera de serie, no sumar para módulo de finura

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

### 6.3.2. Grava.

Se analizaron 3 tipos de grava procedentes de diferentes puntos del Valle de México, es decir, dos son procedente del estado de Hidalgo de distintos bancos siendo ambas Calizas y la tercera es un Basalto del estado de Morelos.

Se procedió a efectuar los análisis correspondientes para determinar su granulometría, absorción, peso específico, peso volumétrico suelto y peso volumétrico compacto, de cada una de ellas, de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM - C) 30, 73, 77, 111, 164<sup>82</sup> y 170.

#### CARACTERÍSTICAS CALIZA # 1<sup>Φ</sup>

ASTM	Retenido en peso (gr.)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
1 1/2"	0	0	0
1"	23	1.15	1.15
3/4"	288	14.42	15.57
1/2"	1212	60.69	76.26
3/8"	285	14.27	90.53
4	18	9.02	99.55
charola	9	0.45	100

P <sub>esss</sub>	P <sub>es</sub>	Abs	P.V.S.	P.V.C.	T.N.
kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	mm
2.81	2.79	0.9	1369.07	1522.93	25

Al determinar la prueba de granulometría de la caliza # 1 se vio que no cumplía con la norma NOM - C - 111, también de forma visual se percibió la presencia de mucho material arcilloso adherido a las partículas pétreas, aun con ello se procedió a efectuar la que sería nuestra primera mezcla de concreto. El agua que se utilizó fue potable tomada de la llave del laboratorio, por consiguiente apta para la utilización de la fabricación de nuestro concreto. La nomenclatura empleada en las características del agregado grueso es la siguiente:

<sup>82</sup> "Determinación de la Masa Especifica y Absorción de agua del agregado grueso", (NOM-C-164), apud. Fernández O. Construcción I. UAM-Azc. México. 1992. págs. 127-139.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

$P_{esss}$  = Peso específico sat. sup. seca       $P_{es}$  = Peso específico seco  
 Abs = Absorción      T.N. = Tamaño Nominal  
 P.V.S. = Peso volumétrico suelto      P.V.C. = Peso volumétrico compacto

### CARACTERÍSTICAS CALIZA # 2<sup>Φ</sup>

ASTM	Retenido en peso (gr.)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
1 1/2"	0	0	0
1"	17	1.21	1.21
3/4"	177	12.55	13.76
1/2"	648	45.72	59.68
3/8"	169	11.97	71.65
4	350	24.81	96.46
charola	5	3.54	100

$P_{esss}$ kg/dm <sup>3</sup>	$P_{es}$ kg/dm <sup>3</sup>	Abs %	P.V.S. kg/m <sup>3</sup>	P.V.C. kg/m <sup>3</sup>	T.N. mm
2.74	2.71	0.95	1431.74	1536.86	25

### CARACTERÍSTICAS DEL BASALTO<sup>Φ</sup>

ASTM	Retenido en peso (gr.)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
1 1/2"	0	0	0
1"	100	3.28	3.28
3/4"	195	6.40	9.68
1/2"	1100	36.10	45.78
3/8"	522	17.13	62.91
4	620	20.35	83.26
charola	510	16.74	100

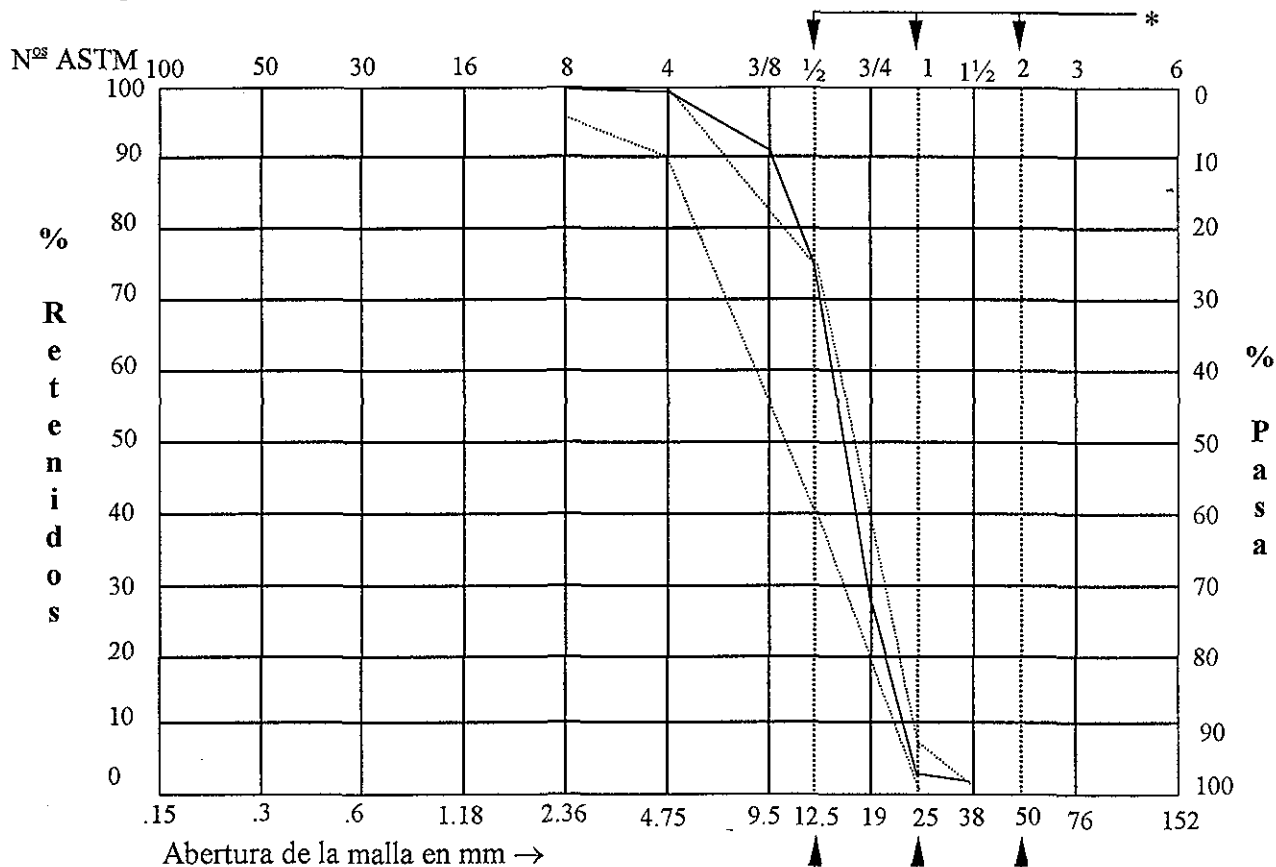
$P_{esss}$ kg/dm <sup>3</sup>	$P_{es}$ kg/dm <sup>3</sup>	Abs %	P.V.S. kg/m <sup>3</sup>	P.V.C. kg/m <sup>3</sup>	T.N. mm
1.64	1.54	6.04	1049.8	1194.8	25

De la misma forma se realizaron las pruebas correspondientes de la caliza #2 y del basalto, se puede ver en las curvas granulométricas de los agregados gruesos, paginas subsecuentes, que tampoco están comprendidas al 100% dentro de los límites establecidos de acuerdo a su tamaño nominal.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

# Análisis físico de agregados - GRÁFICA GRANULOMÉTRICA<sup>Ⓞ</sup>

Clase y procedencia CALIZA HIDALGO BANCO 1



Abertura malla mm.	Nom. ASTM	Retenido en Peso	Retenido Parcial %	Retenido acumulado %
G 76	3			
G 50	2 *			
G 38	1 1/2	0	0	0
G 25	1 *	23	1.15	1.15
G 19	3/4	288	14.42	15.57
G 12.5	1/2 *	1212	60.69	76.26
G 9.5	3/8	285	14.27	90.53
G 4.75	4	180	9.02	99.55
M 2.36	8			
M 1.18	16			
M 0.6	30			
M 0.3	50			
M 0.15	100			
Charola *		9	0.45	100
Total		1997	100	705.65

Peso muestra kg.	1.997
Tamaño nominal	25mm
Módulo de finura	7.06
Densidad S.S.S.	
Absorción %	
Humedad %	
Peso Vol. Seco Suelto	
Peso Vol. Seco Comp.	
Material suave %	
Terrones %	
Materia orgánica	
Pérdida por lavado %	
Densidad seca	

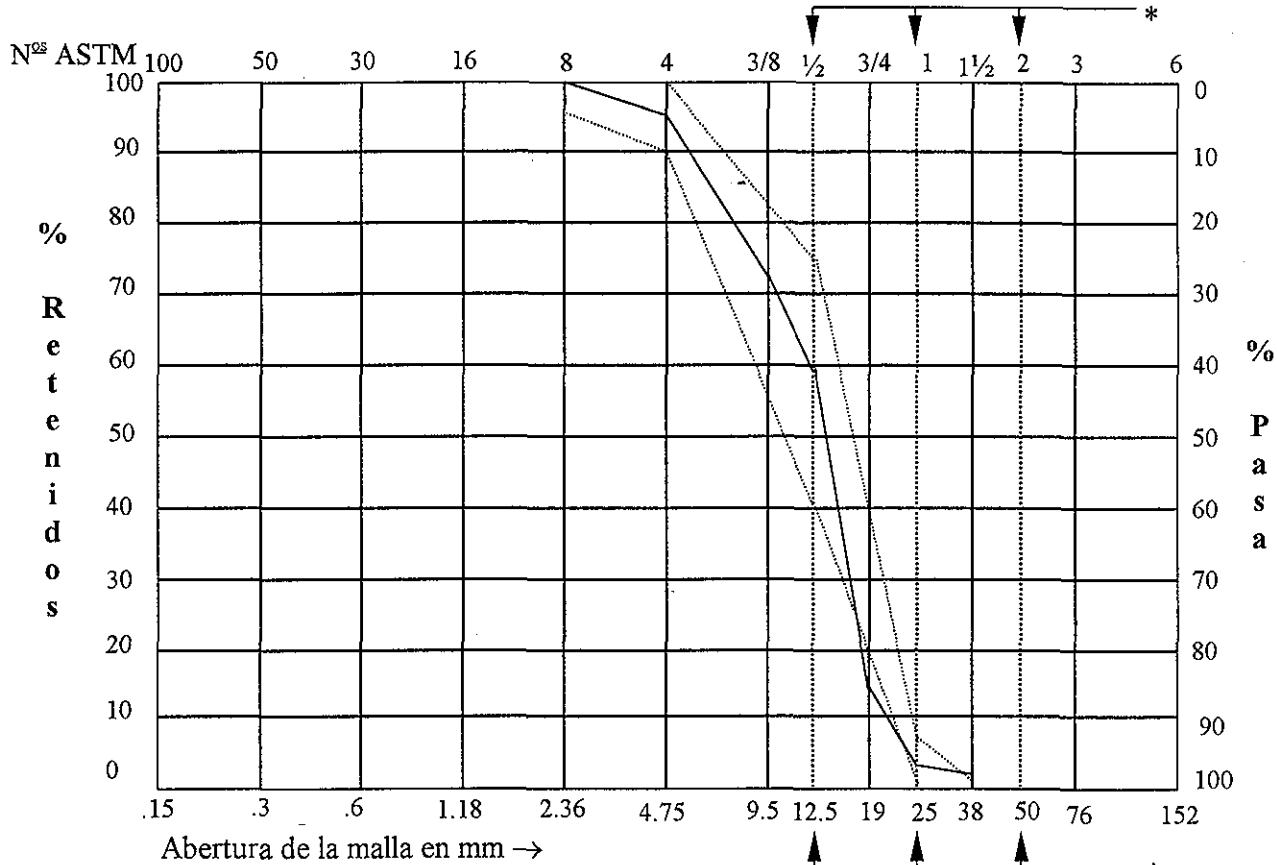
\* Fuera de serie, no sumar para módulo de finura

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes



# Análisis físico de agregados - GRÁFICA GRANULOMÉTRICA<sup>Ⓞ</sup>

Clase y procedencia CALIZA HIDALGO BANCO 2



Abertura malla mm.	Nom. ASTM	Retenido en Peso	Retenido Parcial %	Retenido acumulado %
G 76	3			
G 50	2 *			
G 38	1 1/2	0	0	0
G 25	1 *	17	1.20	1.20
G 19	3/4	177	12.54	13.74
G 12.5	1/2 *	648	45.93	59.67
G 9.5	3/8	169	11.98	71.65
G 4.75	4	350	24.81	96.46
M 2.36	8			
M 1.18	16			
M 0.6	30			
M 0.3	50			
M 0.15	100			
Charola *		50	3.54	100
Total		1411	100	681.85

Peso muestra kg.	1.411
Tamaño nominal	25mm
Módulo de finura	6.82
Densidad S.S.S.	
Absorción %	
Humedad %	
Peso Vol. Seco Suelto	
Peso Vol. Seco Comp.	
Material suave %	
Terrones %	
Materia orgánica	
Pérdida por lavado %	
Densidad seca	

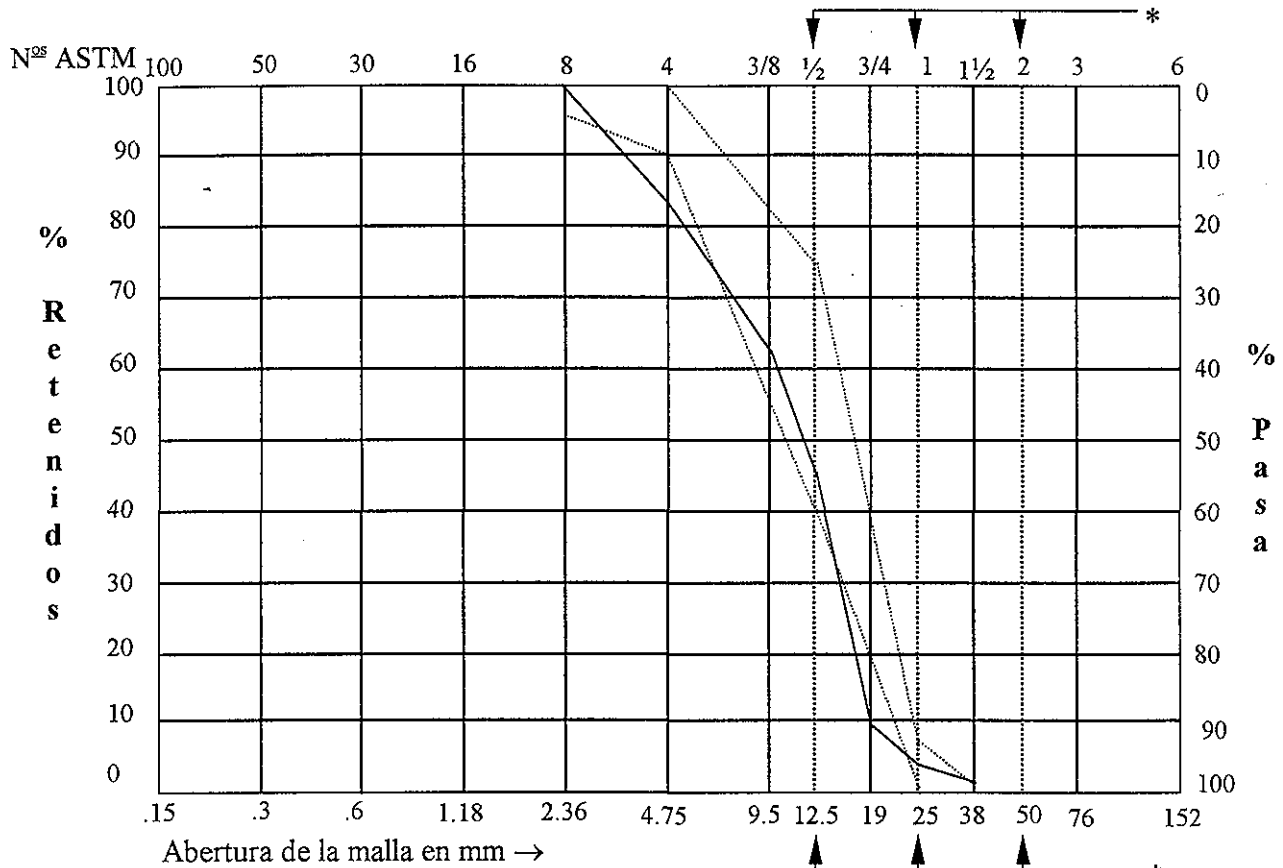
\* Fuera de serie, no sumar para módulo de finura

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# Análisis físico de agregados - GRÁFICA GRANULOMÉTRICA <sup>Φ</sup>

Clase y procedencia BASALTO MORELOS



Abertura malla mm.	Nom. ASTM	Retenido en Peso	Retenido Parcial %	Retenido acumulado %
G 76	3			
G 50	2 *			
G 38	1 1/2	0	0	0
G 25	1 *	100	3.28	3.28
G 19	3/4	195	6.40	9.68
G 12.5	1/2 *	1100	36.10	45.78
G 9.5	3/8	522	17.13	62.91
G 4.75	4	620	20.35	83.26
M 2.36	8			
M 1.18	16			
M 0.6	30			
M 0.3	50			
M 0.15	100			
Charola *		510	16.74	100
Total		3047	100	655.85

Peso muestra kg.	3.047
Tamaño nominal	25mm
Modulo de finura	6.56
Densidad S.S.S.	
Absorción %	
Humedad %	
Peso Vol. Seco Suelto	
Peso Vol. Seco Comp.	
Material suave %	
Terrones %	
Materia orgánica	
Pérdida por lavado %	
Densidad seca	

\* Fuera de serie, no sumar para módulo de finura

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los estudios realizados a la arena de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

#### 6.4. Aditivos.

Los aditivos químicos que se emplearon fueron dos, un reductor de agua de alto rango y un plastificante, de los cuales podemos hacer referencia a las fichas técnicas que proporciona el distribuidor correspondiente las cuales indican lo siguiente:

##### REDUCTOR DE ALTO RANGO

Se utiliza para producir concretos rheoplásticos. El concreto rheoplástico fluye fácilmente, manteniendo una alta plasticidad por un período de tiempo inigualable por cualquier otro aditivo superplastificante. Aún así, conserva la baja relación A/C de un concreto sin revenimiento y sin aditivo. Las características de retención de plasticidad del concreto rheoplástico permite añadir el aditivo aún en la planta de concreto. Este aditivo cumple con las normas ASTM- C-494.

##### Características del concreto plástico:

- Rango de plasticidad de 200 a 280 mm
- Plasticidad retenida durante un tiempo mayor
- Tiempo de fraguado controlado
- Cohesivo y sin segregación
- Mínimo sangrado

##### Características en el concreto endurecido:

- Se producen mayores resistencias iniciales
- Mayor resistencia final a la compresión
- Mejor adherencia al acero
- Baja permeabilidad y alta durabilidad
- Menores contracciones y fluencia

## ADITIVO PLASTIFICANTE

Es un aditivo plastificante líquido para usarse y producir un concreto de mayor calidad y uniformidad. Éste aditivo excede las especificaciones de ASTM-C-494, AASHTO M-194 y CRD C-87

### Características del concreto plástico:

- Mejora las características del acabado
- Mejora la trabajabilidad
- Reduce la segregación y el sangrado

### Características en el concreto endurecido:

- Mejora la apariencia en las superficies pulidas
- Aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión, así como la adherencia al acero de refuerzo
- Reduce la permeabilidad y el agrietamiento
- Aumenta la resistencia del concreto con aire incluido, sujeto a ciclos de congelamiento y deshielo y a los efectos de descamación por sales deshielantes

# **CAPÍTULO 7**

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## CAPÍTULO 7. Desarrollo experimental.

### 7.1. Recomendaciones y consideraciones previas a la elaboración de las mezclas del programa

Se consideró que se contaba con la información suficiente para poder plantear los procedimientos que utilizaríamos en nuestras mezclas de prueba, sin embargo, era necesario precisar algunos conceptos que llevarán a plantear lo mejor posible, los procedimientos que se utilizarían en el programa de trabajo.

Para la producción de concretos de alta resistencia, en forma general, los investigadores coinciden en que son indispensables: el empleo selectivo de materiales, un enfoque diferente en los procedimientos de diseño de la mezcla, atención especial en la compactación del concreto y un control de calidad más riguroso que el normal.

Al respecto, el método más significativo en la dosificación de concreto tradicional lo constituye sin duda el conjunto de recomendaciones del Comité del A.C.I. (American Concrete Institute), que es aplicable a los concretos cuyas características más significativas<sup>83</sup> son las siguientes.

Resistencia a compresión, MPa	$13 \leq f'_c \leq 41$
Relación agua/cemento	$0.41 \leq a/c \leq 0.82$
Revenimiento, mm	$25 \leq C \leq 175$
Tamaño máximo del agregado grueso mm	$9.5 \leq D \leq 150$
Módulo de finura del agregado fino	$2.4 \leq M_f \leq 3.0$

La dosificación del A.C.I. se realiza con apoyo de unas tablas que permiten establecer los pesos de cada uno de los componentes, para lograrlo se tiene que seguir una secuencia predeterminada.

Sin embargo, ni las tablas del A.C.I., ni algún otro de los métodos de dosificación que existen, tienen validez para dosificar concretos con resistencias superiores a

<sup>83</sup> Elaboración propia con base a las tablas de "Standar Practice for Selecting... op. cit., págs. 21 a 27.

los 60 MPa, revenimientos iguales o superiores a 175 mm y valores de relación agua/cemento iguales o inferiores a 0.3. Por este motivo las investigaciones realizadas se han iniciado de forma distinta y de acuerdo a la resistencia requerida, características de los materiales, tipo de aplicación y edad requerida de prueba, por lo tanto, se da una descripción de las consideraciones más usuales para alcanzar resistencias superiores.

Muchos investigadores indican que la relación agua/cemento es simplemente el factor más importante relativo a la producción de concreto de alta resistencia. Indicando que esto es cierto únicamente después de conocer el óptimo esfuerzo de los materiales que lo producen. Se reportan relaciones agua/cemento comprendidas en el rango de 0.30 a 0.40, 0.21 a 0.31, menores de 0.30 y cercanas a 0.20, obviamente éstas podrán ser obtenidas de acuerdo con los materiales empleados en la elaboración de las mezclas de concreto. Estas relaciones en la mayoría de los casos necesitan procedimientos especiales para obtener una efectiva consolidación.

Para la elaboración de concretos de alta resistencia se han usado diferentes cantidades de cemento, por ejemplo, se dan rangos como el de 392 kg/m<sup>3</sup> a 557<sup>84</sup> kg/m<sup>3</sup> y el de 400 kg/m<sup>3</sup> a 600<sup>85</sup> kg/m<sup>3</sup> entre otros, sin embargo, también se menciona que, para alcanzar altas resistencias, dependerá en gran parte de la técnica que se utilice para consolidar el concreto.

Se hace también hincapié que lo más conveniente es determinar el contenido óptimo de cemento a través de mezclas experimentales en el laboratorio, para estas pruebas se utiliza la norma ASTM C 109 (NOM-C-61), además que es conveniente probar diferentes tipos y marcas para que posteriormente se emplee aquel que proporcione las mejores resistencias en las pruebas físicas respectivas<sup>86</sup>.

---

<sup>84</sup> "State of the Art Report... op. cit., pág. 363R-10

<sup>85</sup> WALRAVEN, J.C. op. cit., pág. 70.

<sup>86</sup> Cfr. Blick Ronald, L. op. cit., págs. 143 y 144.

Los investigadores recomiendan que cuando se utilicen aditivos minerales finamente divididos, en el proceso de elaboración de concretos de alta resistencia, deberá de efectuarse una selección y evaluación de ellos como cualquier material de la mezcla, es decir, su disponibilidad en el mercado y efectuar los ensayos necesarios en el laboratorio para establecer las cualidades óptimas deseables.

Por otra parte se indican que la incorporación de los aditivos minerales finamente divididos a las dosificaciones de concretos de alta resistencia es importante porque modifica la estructura del concreto y además provoca la reducción del contenido de agua, por lo que es indispensable el sustituirla mediante la incorporación de un aditivo químico preferentemente un superplastificante.

Es fundamental tener un concepto claro de los procesos que modifican la microestructura del concreto y su influencia en la resistencia, para seleccionar los materiales y métodos que deben emplearse. Es evidente que las prestaciones aportadas por el aditivo que nos ocupa dependen, del tamaño de sus partículas, de la uniformidad de su dispersión en el mezclado, de sus propiedades puzolánicas y cementantes, y, por último, de las condiciones de curado impuestas.

Es muy importante la compatibilidad del aditivo con el cemento, en tipo y cantidades para la dosificación. El método de la adición del aditivo deberá garantizar una buena distribución del mismo en todo el concreto, además, la mezcla adecuada es crítica para un desarrollo uniforme<sup>87</sup>.

La utilización de los aditivos tiene como objetivo lograr mejoras en la resistencia, controlar tiempos de fraguado y tener una buena trabajabilidad, todas estas mejoras serán posibles al conseguir un proporcionamiento óptimo entre los

---

<sup>87</sup> Cfr. MALHOTRA V. M., "Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete", *Concrete International*, mayo. 1981. pág. 68, 74.



aditivos utilizados. Cuando se usa una combinación de aditivos, todos ellos deberán de ser disueltos individualmente de tal manera que la secuencia en que se empleen tenga como objetivo obtener los resultados deseados.

Con relación a los agregados, el procedimiento recomendado en general, tanto para el agregado grueso como el fino, deben cumplir como mínimo los requerimientos de la norma NOM-C-111 (ASTM C 33); sin embargo, algunas excepciones pueden ser benéficas.

Los agregados finos que se prefieren son aquellos que tienen partículas en forma redondeada de textura lisa, sobre todo que requieran poca agua en el mezclado siendo este efecto más importante que el de su disposición física. En cuanto a la reducción del requerimiento de agua se sugiere que las cantidades que pasan las mallas No 50 y 100 se mantengan bajas<sup>88</sup>, pero siempre de acuerdo a la norma anteriormente mencionada. Se recomienda un módulo de finura alrededor de 3.0 porque se tiene una mejor trabajabilidad y resistencia a la compresión<sup>89</sup>.

Con relación a los agregados gruesos, como ya se mencionó en la sección anterior, se sugiere el empleo de tamaños máximos de agregado de 12.7mm (1/2in) y de 9.5mm (3/8 in), aunque tamaños de 19.0mm (3/4 in) y 25.4mm (1 in) han sido utilizados con buenos resultados<sup>90</sup>. Se prefiere la piedra triturada<sup>91</sup> que la grava redondeada, porque se supone que la geometría y la forma influyen en la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Se menciona además que el tamaño y la forma del agregado tiene gran influencia en la trabajabilidad de la mezcla, y la interacción química con la pasta de cemento puede afectar la adherencia.

---

<sup>88</sup> Cfr. "State of the Art Report... op. cit., 363R-12.

<sup>89</sup> Cfr. BLICK, Ronald L., et. al., op. cit.,pág. 147.

<sup>90</sup> Cfr. COOK James E., "Research and Application of High Strength Concrete 10,000 psi Concrete", *Concrete International*, 1989. October. pág. 68 y 69.

<sup>91</sup> Cfr. SAUCIER, Kenneth L. op cit., pág. 37

Como resultado natural del análisis de estas consideraciones y al tener en cuenta las técnicas de dosificación de los concretos de alta resistencia, se percibió que sería necesario partir de tres premisas fundamentales:

- 1) El estudio de la dosificación de los materiales para la obtención de concretos de alta resistencia es un proceso lento, dado que debe basarse, en todos los casos, en la propia experimentación, partiendo de las características más significativas de los materiales disponibles en la zona. Las variables que intervienen son elevadas y las variantes a considerar son numerosas. Por lo que el producto de variables por variantes conduce a un número de combinaciones cuya experimentación es inviable en un plazo razonable.
- 2) No existe una proporción directa entre las relaciones "agua/cemento" o "agua/material cementante" y la resistencia, ya que para una relación dada "agua/material cementante", la resistencia puede estar afectada significativamente por el tipo y cantidad de adición mineral empleada. En conclusión, puesto que la clase de áridos, los tipos y cantidades de adiciones pueden influir sobre las características de las propiedades mecánicas de los concretos de alta resistencia, y dichos factores no han sido tenidos en cuenta en el método A. C. I. - 211, lo que nos lleva a un proceso de dosificación diferente para poder determinar las proporciones de mezcla más convenientes.
- 3) Si bien son conocidas las características microestructurales necesarias para obtener un concreto de alta resistencia, no es fácil conseguir una combinación perfecta de cemento, áridos, agua y aditivos, debido a que su ajuste requiere de una serie de tanteos sucesivos de tecnología compleja. Por lo tanto la mayoría de las dosificaciones, se efectúan a partir de numerosos ensayos de laboratorio, por consiguiente las proporciones resultantes son aplicables exclusivamente a los materiales empleados en los ensayos.

Teniendo en cuenta estas tres premisas y sabiendo que los procedimientos empleados en la elaboración de las mezclas se encaminan principalmente a la correcta combinación de aquellos elementos y factores que favorezcan el aumento de resistencia. Por otra parte se determinan que;

No necesariamente debe pensarse que el empleo de altas cantidades de cemento es benéfico para este tipo de concreto, pues la experiencia señala que un exceso de cemento ocasiona una liberación muy rápida de calor durante la hidratación, esto reducirá finalmente la resistencia del concreto debido a la creación de fisuras y microfisuras producidas por los gradientes térmicos que se presentan<sup>92</sup>.

Por último, hay que hacer notar que si la consideración básica en la producción de concretos normales es fijar la selección de una combinación de materiales que produzcan un concreto de calidad con la trabajabilidad, resistencia y durabilidad deseadas; estos objetivos son más difíciles de lograr cuando se trata de concretos de alta resistencia<sup>93</sup>.

## 7.2. Mezclas de prueba preliminares

De acuerdo con el plan de trabajo elaborado, y a las consideraciones anotadas, sin lugar a duda se debía efectuar la selección del cemento, ésta se realizó sobre la base de la fabricación de morteros, de acuerdo con las normas anteriormente ya mencionadas. En primer término se elaboró una mezcla base con los tres cementos que se consideraron y posteriormente se utilizaron los tres diferentes tipos de aditivos químicos y un aditivo mineral finamente dividido que se podían emplear en las dosificaciones de concreto.

Se consideró conveniente en este momento, y como punto de partida, tomar en cuenta las recomendaciones de artículos especializados y también los resultados que se obtuvieron previamente de los materiales que se utilizarán en la investigación.

---

<sup>92</sup> GÓMEZ, Domínguez J., "Concretos de Resistencia Superior", *Construcción y Tecnología, IMCYC*, vol. IV. núm. 43. diciembre 1991. pág.11.

<sup>93</sup> Cfr. "State of the Art Report... op. cit., pág. 363R-11.

En base a lo anterior, se efectuó un análisis del cemento que podría ofrecer mejores resultados y de acuerdo a estos se consideró que, el llamado "B" era el mejor, teniendo en cuenta que, tiene un módulo de finura relativamente alto, así como los contenidos importantes de compuestos de silicio y calcio; aunque el cemento denominado como "C", bajo los mismos requerimientos, también representa una buena opción. Sin embargo, se consideraron en conjunto, los dos reportes de los resultados químicos, con relación al contenido de los minerales, y presentan algunas dudas de interpretación. Por lo tanto, para tener una certeza del cemento que se emplearía, se procedió a elaborar unas mezclas de mortero, con cada uno de los cementos seleccionados, siguiendo el procedimiento que establece la norma ASTM-C-109 (NOM-C-61), la Tabla 7.2.1. muestra los resultados promedio de las mezclas de mortero (apéndice 1), con los cementos comerciales considerados, llamándolos morteros base sin aditivo, y que por razones naturales<sup>94</sup> se les llamaran "A", "B" y "C".

Edad (días)	Resistencia promedio en kg/cm <sup>2</sup> (MPa)		
	Cemento A	Cemento B	Cemento C
1	104.8	63.75	37.79
3	166.0	135.8	75.7
7	206.9	193.4	131.0
14	307.9	277.9	206.8
28	376.13	354.5	296.2
56	362.0	356.4	218.47

Tabla 7.2.1. - Mezcla de mortero (base) sin aditivo<sup>9</sup>

Como se puede ver en la tabla, el cemento clasificado como "A" fue el que mejores resultados presenta en la prueba correspondiente, seguido el tipo "B" y por último el clasificado como "C".

Así mismo en el proyecto se contempló que sería necesario el uso de aditivos químicos como; reductores de agua de alto rango, superfluidificantes o

<sup>94</sup> Los fabricantes de Cemento solicitaron no se mencionara la marca de su producto en caso de realizar pruebas en ellos.

<sup>9</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la UAM - Azcapotzalco.

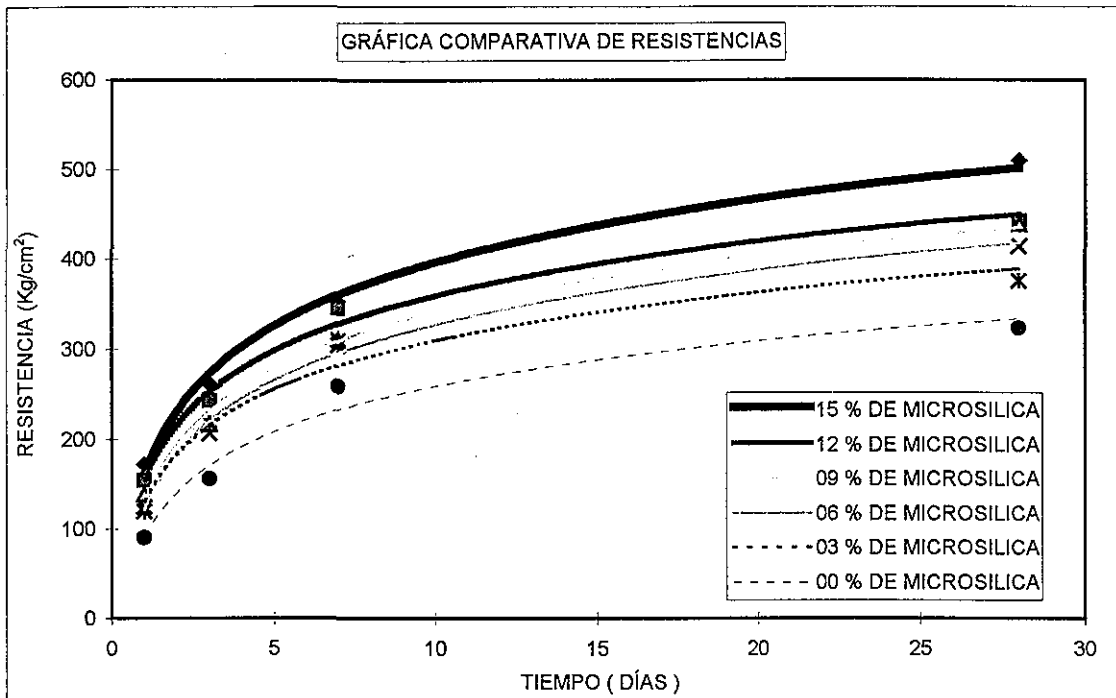
plastificantes, para poder utilizar aditivos minerales finamente divididos tales como; cenizas volantes, escoria de altos hornos ó microsíllica, esta última es la que se utilizará en la investigación que se está llevando a cabo.

También es conveniente la verificación de la compatibilidad de los aditivos químicos con el cemento sobre todo cuando se emplean los aditivos minerales anteriormente mencionados.

Se consideró apropiado que el paso siguiente fuera el de analizar el comportamiento del aditivo mineral finamente dividido que, es un material que será empleado en las mezclas de concreto, como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones este es la microsíllica.

Para el estudio de los efectos del mismo, se procedió a utilizar también la norma ASTM-C-109 (NOM-C-61) variando en cada mortero el porcentaje de microsíllica de acuerdo a la cantidad del cemento empleado. Se considera conveniente determinar los porcentajes en 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15% y 20%. Sin menoscabo de que se recomiendan para su uso rangos que varían del 5% al 15% del peso total del cemento utilizado. De acuerdo a la información obtenida este material tendrá la función de aumentar la resistencia del mortero. Se procedió para ello de la siguiente forma; se usaron las cantidades de cemento, agua y arena especificadas para la elaboración de morteros; en el caso del agregado fino se utilizó la que propiamente se empleará en la dosificación de concreto.

De acuerdo a los resultados obtenidos (apéndice 1) fue posible elaborar una gráfica que ilustrara el comportamiento de los diferentes porcentajes de la microsíllica con sus resistencias a través del tiempo (Gráfica 7.2.1). Es conveniente mencionar que con el porcentaje del 20% se presentó una mezcla muy árida por lo que se desechó.



Gráfica 7.2.1. – Resistencia de los morteros con diferentes porcentajes de microsilica<sup>Φ</sup>.

Como se puede ver, el mejor porcentaje de microsilica que se encontró fue el del 15%, tal como se puede distinguir en el gráfico 7.2.1.

Un aspecto interesante que se observó al realizar las diferentes mezclas fue la disminución de la fluidez de las mismas, conforme se incrementaba el porcentaje de la microsilica. Para ilustrarlo se elaboró una gráfica en la cual se puede ver una curva de tendencia descendente (Gráfica 7.2.2.), los datos de la obtención de la misma se encuentran en el apéndice 1, es importante señalar que únicamente se efectuaron dos pruebas por cada porcentaje considerado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la UAM – Azcapotzalco.

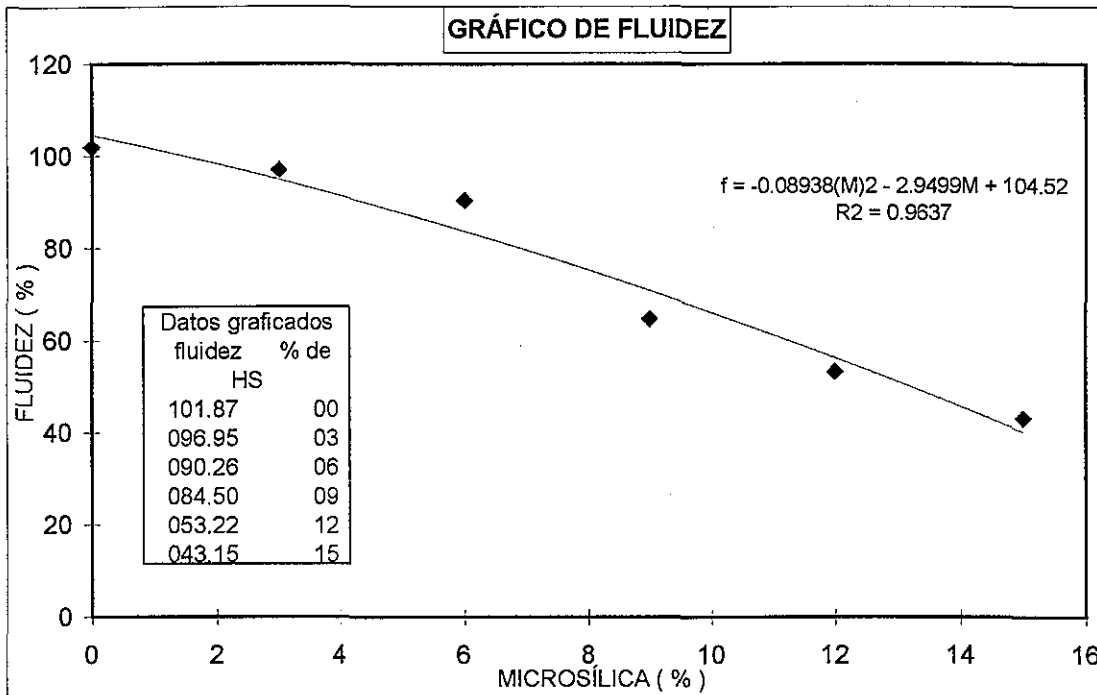


Gráfico 7.2.2. – Fluidez del mortero en relación con el contenido de microsíllica<sup>φ</sup>.

De la gráfica se puede deducir que para incrementos iguales de microsíllica no corresponden decrementos proporcionales en la disminución de la fluidez, la curva presentada es de segundo orden, es evidente también el efecto considerable que se tiene con relación a la pérdida de fluidez para el 15%, la cual llega a bajar hasta aproximadamente el 58% de la trabajabilidad en relación con el mortero sin el aditivo mineral mencionado, lo cual indica que la microsíllica está (absorbiendo) utilizando alrededor de la mitad del agua empleada en el mortero, es oportuno señalar nuevamente que, la prueba con el 20% ya no fue factible realizarla porque se presentó una mezcla demasiado árida.

Una vez obtenidos los resultados de los morteros sin aditivo y los que contienen la microsíllica, de acuerdo a la norma ASTM-109 (NOM-C-61), se procedió a elaborar otros morteros con la finalidad de determinar qué cemento, mezclado con

el aditivo mineral y el aditivo químico, sería el más apropiado para obtener los mejores resultados, en los fines que se persiguen. Se procedió a la elaboración de ellos considerando que se tiene que mantener una buena trabajabilidad del mortero y sabiendo anticipadamente que el cemento, de acuerdo a su composición química, reaccionará de diferentes formas con estos elementos, consecuentemente puede ser el mismo cemento que originalmente presentó los mejores resultados u otro diferente.

Se procedió de la siguiente manera; se consideró el 15% de la microsilica en relación con el peso del cemento, se efectuaron varias mezclas con lo diferentes cementos y aditivos, primero con un aditivo que se llamó "X" siendo este un aditivo propiamente conocido como superfluidificante, posteriormente con un aditivo nombrado plastificante.

Como es natural en este momento se tenía que definir qué cantidad de agua se debía sustituir por el aditivo ó si éste sería parte de la mezcla, además del agua correspondiente, la lógica indica que se debía ir sustituyendo por el agua, y así disminuir en lo posible la relación agua/cemento. Se determinó disminuir la cantidad de agua con relación al peso del cemento en la misma proporción constante en que se incrementó la microsilica (15%), es decir, se quitaron 7.5 ml de agua y se añadió la misma cantidad en volumen de aditivo químico.

Se realizó otra mezcla pero en esta ocasión se consideraron 15 ml menos de agua y la misma cantidad de aditivo químico sustituyéndola. No se efectuaron más pruebas, reduciendo el volumen de agua y aumentando el aditivo, porque el objetivo era encontrar cuál cemento es el que mejor comportamiento tenía ya mezclado con la microsilica y el aditivo químico.

---

Ⓢ Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la UAM – Azcapotzalco.



Los promedios de los resultados (apéndice 1), con la variante anteriormente mencionada, se muestran en los cuadros de las tablas 7.2.2. y 7.2.3. respectivamente.

Edad (días)	Resistencia promedio en kg/cm <sup>2</sup> (MPa)		
	Cemento A	Cemento B	Cemento C
1	114.77	75.82	334.40
3	251.36	218.58	170.66
7	352.60	277.43	226.21
28	393.43	376.74	352.48
56	436.00	385.57	370.71
91	443.62	325.53	421.88

Tabla 7.2.2. - Mezcla de mortero con 15% aditivo "X" y 15% de microsíllica<sup>Φ</sup>.

Edad (días)	Resistencia promedio en kg/cm <sup>2</sup> (MPa)		
	Cemento A	Cemento B	Cemento C
1	84.51	73.96	9.59
3	205.23	223.53	111.39
7	273.54	298.38	276.34
28	436.16	366.37	344.85
56	498.29	398.29	375.46
91	523.43	357.93	401.71

Tabla 7.2.3. - Mezcla de mortero con 30% de aditivo "X" y 15% de microsíllica<sup>Φ</sup>.

Como se puede observar, en los resultados mostrados en las dos tablas anteriores, el mejor cemento que reaccionó con el aditivo empleados fue el cemento llamado "A", precedido por el nombrado "C" y finalmente el denominado "B".

En forma general se puede decir que el cemento que conservó los resultados favorables, al ser mezclado con el aditivo químico y el mineral conjuntamente, es el denominado como "A". Se considera pertinente efectuar un ligero análisis de los resultados presentados, con relación a los esfuerzos que se pueden tener

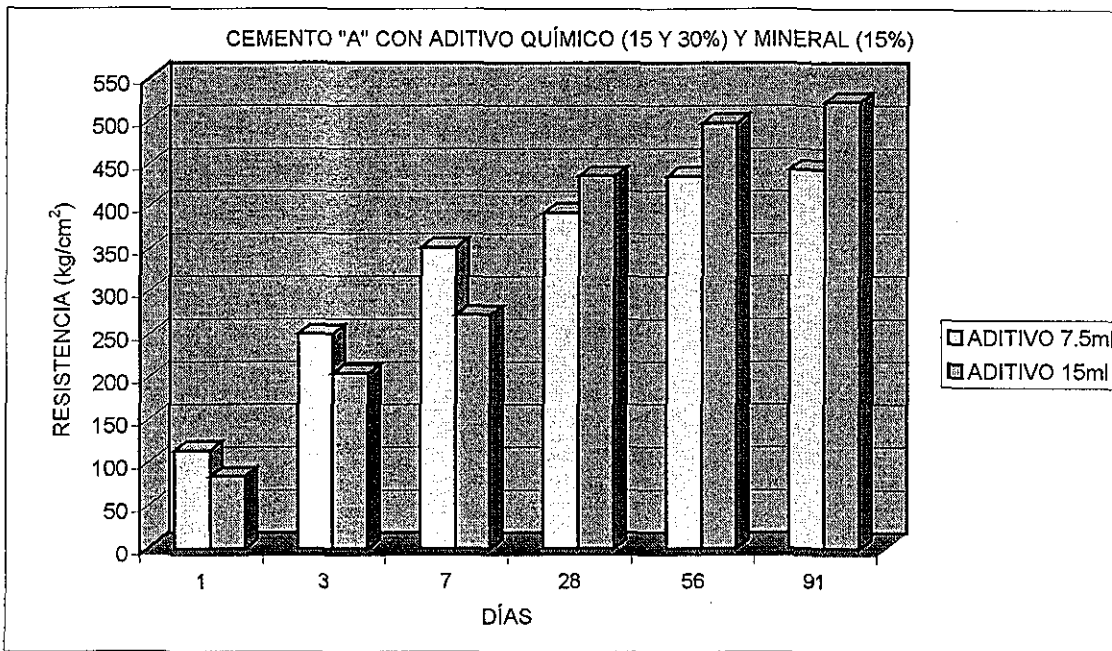
<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la UAM – Azcapotzalco.

entre las diferentes cantidades de aditivo de las mezclas, para ello se elaboraron unas gráficas que lo facilitaran.

En la gráfica 7.2.4. se ve que el cemento denominado como "A" presenta resistencias mayores en los primeros 7 días con la cantidad de 7.5ml, no así con la de 15ml que, posteriormente al tiempo indicado, tiene un mejor comportamiento a la resistencia.

La gráfica 7.2.5., cemento "B", en forma general alcanza mejor resistencia con el 15% de aditivo químico que con el de 7.5 %

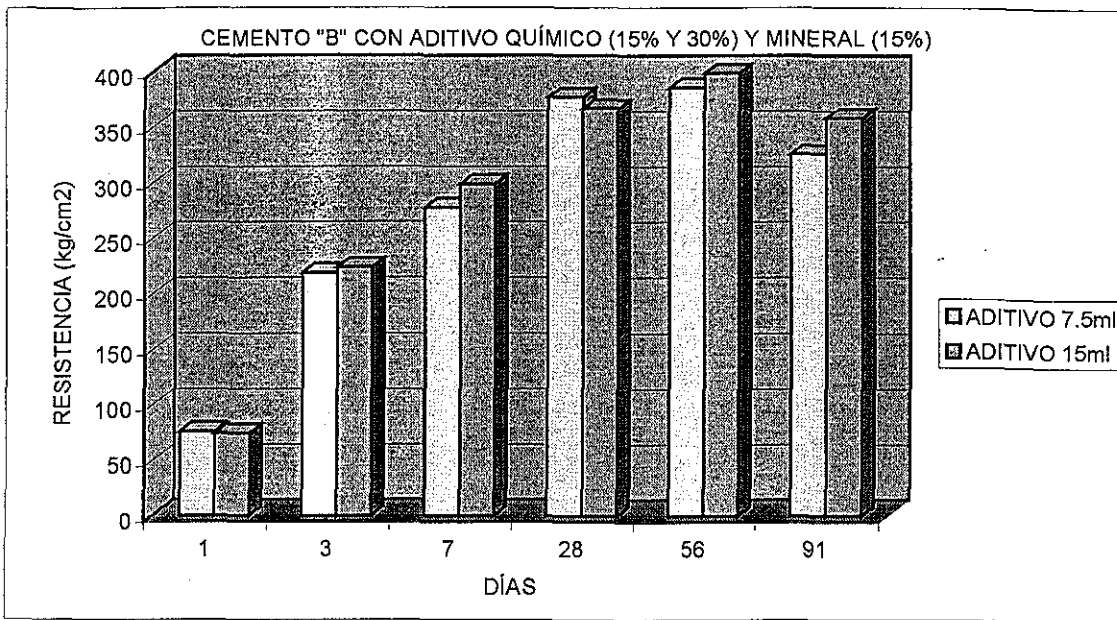
Finalmente el cemento llamado "C" presenta un comportamiento de una forma un tanto irregular, según se puede ver en la gráfica 7.2.6.



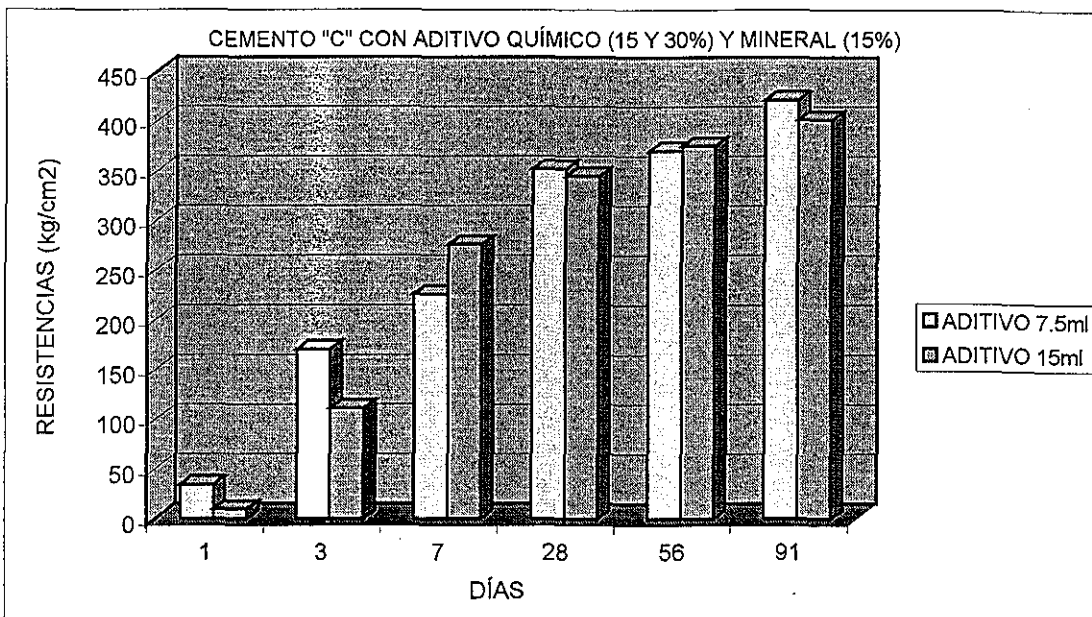
Gráfica 7.2.4. – Cemento "A" con aditivo químico y mineral<sup>φ</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la UAM – Azcapotzalco.



Gráfica 8.2.5. - Cemento "B" con aditivo químico y mineral<sup>Φ</sup>



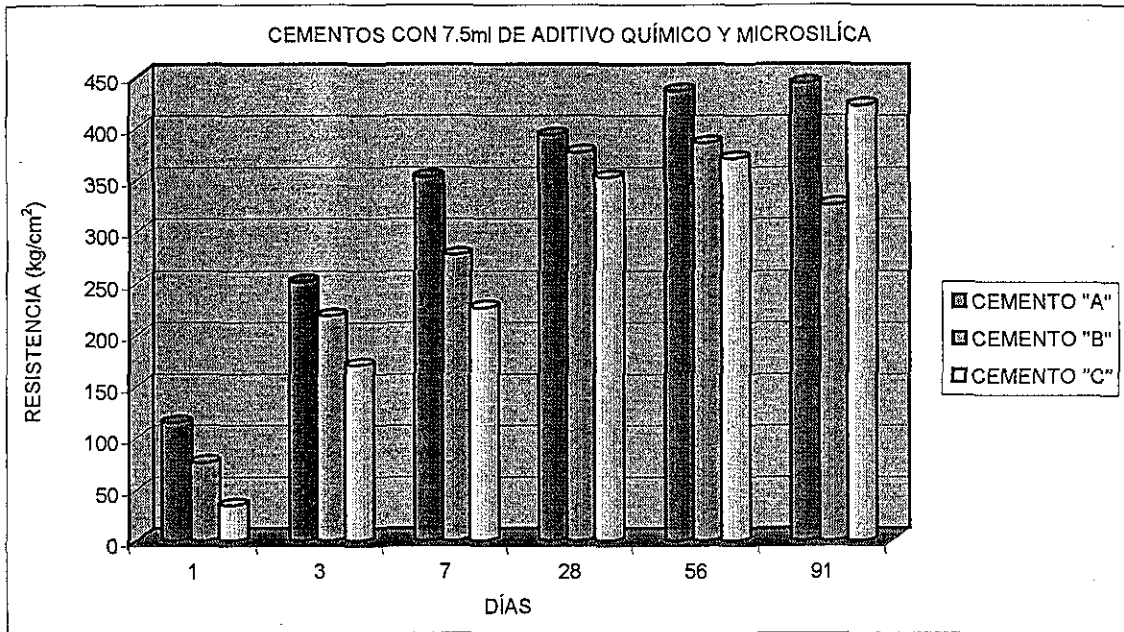
Gráfica 7.2.6. - Cemento "C" con aditivo químico y mineral<sup>Φ</sup>

Si se tiene en cuenta que, el objetivo principal es el de determinar cual es el mejor cemento, de los tres analizados, el denominado "A" es el que presentó mejores resultados, según se aprecia en las gráficas 7.2.7. y 7.2.8. en las cuales

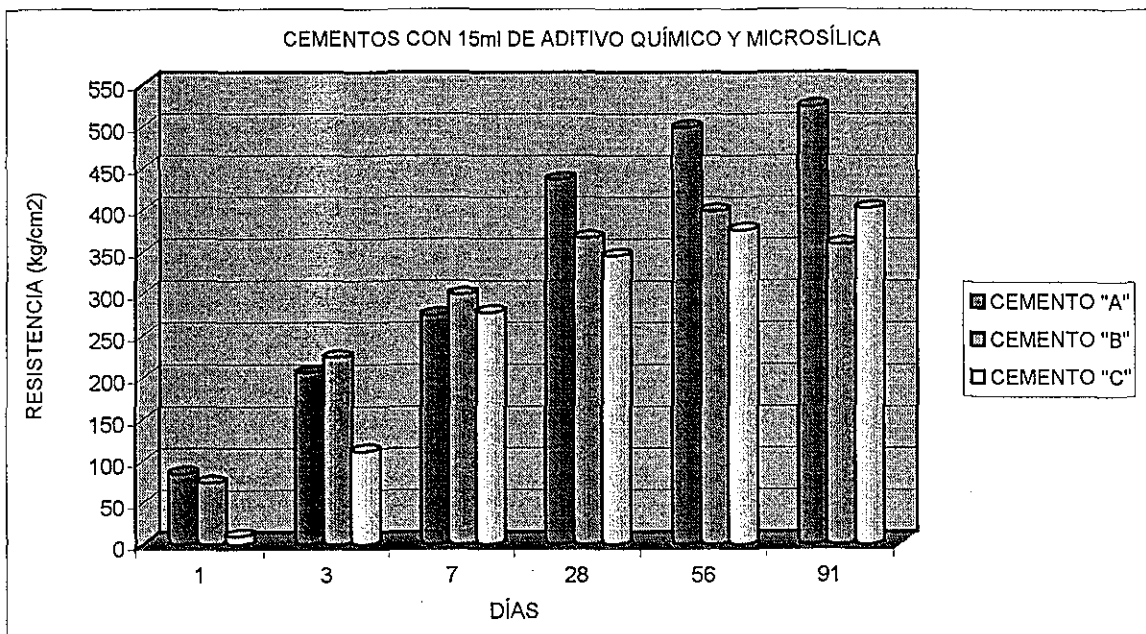
<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

las diferentes marcas tienen un contenido de 7.5 y 15ml de aditivo químico respectivamente, y el 15% de microsíllica, con relación al peso de cemento en ambos casos.



Gráfica 7.2.7. – Cementos "A", "B" y "C" con 15% de aditivo químico y 15% de aditivo mineral finamente dividido (microsíllica) con relación al peso del cemento<sup>Ⓞ</sup>



Gráfica 7.2.8. – Cementos "A", "B" y "C" con 30% de aditivo químico y 15% de aditivo mineral finamente dividido (microsíllica) con relación al peso del cemento<sup>Ⓞ</sup>

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Analizando los dos contenidos diferentes de aditivo químico podemos decir que, el que presentó mejores resultados a la resistencia, fue el que tenía 15ml de aditivo químico.

Se efectuó una prueba más con otro aditivo químico, un plastificante, pero únicamente utilizamos el cemento tipo "A", porque fue el que mantuvo las mejores condiciones, para ver cómo sería su comportamiento ya que este aditivo le proporcionaría características de trabajabilidad más duraderas a tempranas edades.

Para lo cual se siguió el mismo procedimiento de quitar agua y sustituirla por el aditivo. Los promedios de los resultados (apéndice 1) se muestran en las tablas 7.2.4 y 7.2.5., con un contenido de 7.5ml y 15ml de un aditivo plastificante respectivamente.

Edad (días)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	65.26
3	175.84
7	271.06
28	372.67
56	401.33
91	403.50

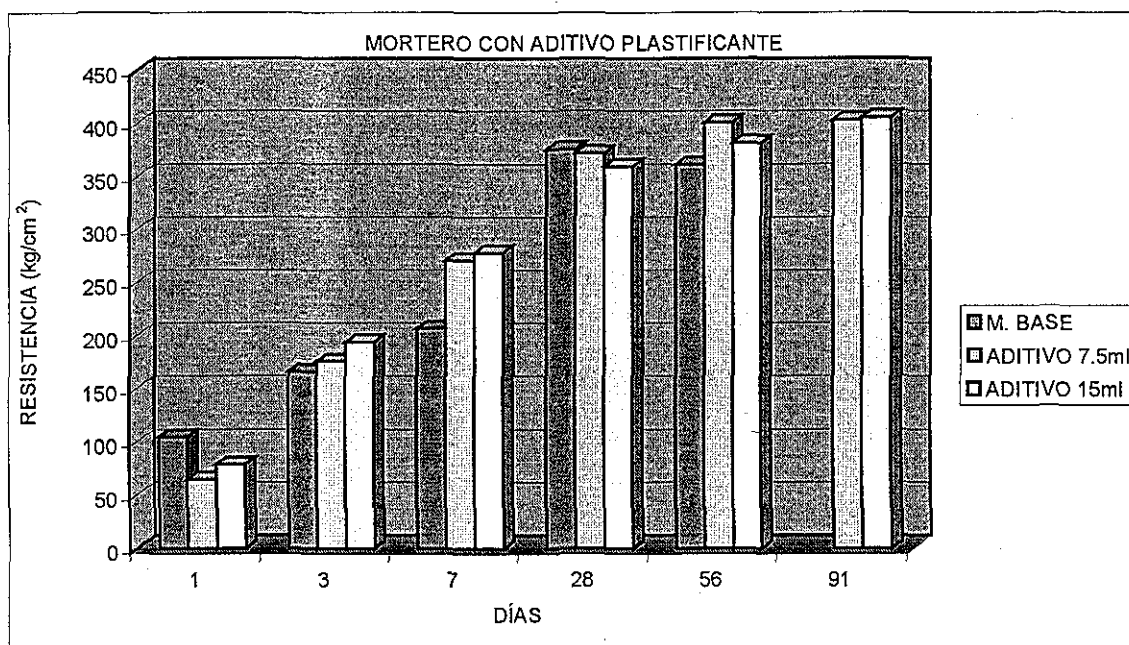
Tabla 7.2.4. - Mezcla de mortero con el cemento "A" y 7.5ml de aditivo plastificante<sup>Ø</sup>.

Edad (días)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	79.09
3	194.28
7	278.57
28	360.00
56	382.02
91	405.92

Tabla 7.2.5. - Mezcla de mortero con el cemento "A" y 15ml de aditivo plastificante<sup>Ø</sup>.

<sup>Ø</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio

Al analizar el comportamiento del mortero base con el que tiene el aditivo plastificante, gráfica 7.2.9, se puede decir que, aunque aparentemente no marca grandes diferencias con relación a la resistencia final, sí presentó características plásticas con un lapso de tiempo mayor. Se puede visualizar el comportamiento plástico a la edad de un día, se puede deducir con relación a que, su resistencia fue inferior con el aditivo plastificante en las dos cantidades inclusive en comparación con el mortero base, se supone que se encuentra en forma potencial aún su resistencia como se puede verificar en los días posteriores.



Gráfica 7.2.9. – Mortero “Base” y, morteros con 7.5 y 15ml de aditivo plastificante<sup>Ⓟ</sup>

Resumiendo y como se puede observar el cemento tipo “A” fue el que mejores resultados presentó al ser mezclado con un aditivo químico y, se puede también mencionar que, con el último aditivo (plastificante) tuvo resultados favorables ya que además de presentar un estado plástico de mayor durabilidad a su vez hubo un ligero incremento de resistencia comparándolo con el mortero base.

<sup>Ⓟ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 7.3. Dosificaciones de concreto de alta resistencia.

De acuerdo con el planteamiento del trabajo, se cuenta con los resultados del análisis de los cementos disponibles, de los morteros de cemento, que con el análisis efectuado en los mismos, se observa cual presentaba los mejores resultados con el aditivo químico, y también la mejor cantidad de microsíllica que se puede añadir a las mezclas.

En este momento y de acuerdo a la metodología que se planteó en el plan de trabajo, es necesario indicar la ubicación del inicio de los trabajos que se realizarían en la investigación.

Sin lugar a duda hay dos opciones que se pueden plantear para el de inicio de las mezclas, la primera consiste en utilizar alguna mezcla previamente encontrada por alguno de los investigadores y definir particularmente cual de ellas se debe emplear y la segunda es la determinación de las cantidades de los materiales a emplear.

Se optó por escoger la primera, es decir, una de las dosificaciones de concreto que se encuentran en los artículos especializados, dándole el nombre de mezcla de "prueba", la cual por lo menos en los resultados obtenidos tenga una resistencia alta a la compresión, y que además se usarán aditivos que estén disponibles de forma genérica en el mercado nacional, o sea, reductores de agua de alto rango o superplastificantes y como aditivo mineral la microsíllica. Por otra parte se tenían que dar uso a los agregados pétreos con los que se disponía.

Como se indicó en el párrafo anterior, se inició con la elaboración de una mezcla de "prueba" para lo cual se tomaron en cuenta las cantidades indicadas en la Tabla 7.3.1. El objetivo principal de esta decisión es el de aprovechar los resultados obtenidos de una de las dosificaciones usadas previamente por los investigadores y con ello procurar dar continuidad, en lo posible, a los trabajos previamente realizados.

Dependiendo de los primeros resultados obtenidos se realizarán variaciones en alguno de los factores que intervengan en el proceso, con el objeto de poder incrementar la resistencia correspondiente para lograr los fines que se persiguen.

MATERIAL	Kg/m <sup>3</sup>
Cemento	513
Grava	1080
Arena	685
Agua	120
Superplastificante	19 lt/m <sup>3</sup>
Microsílica	43

Tiempo de ensaye	Resistencia a la compresión en MPa
7 días	93.2
28 días	119.4
56 días	-----
90 días	145.0

Tabla 7.3.1. – Cantidades de los materiales usados en una investigación y los resultados a la compresión de la mezcla empleada<sup>94</sup>.

Con las cantidades mostradas en la tabla anterior, se procedió a elaborar la mezcla de prueba y así, estar en posibilidades de efectuar algunas comparaciones y tomar las medidas correspondientes para lograr los fines que se persiguen. En el apéndice 1 se indica el proceso que se utilizó para la realización de los mezclados indicando las variaciones efectuadas. Es importante mencionar que se elaboraron tres mezclas variando diferentes factores, como por ejemplo, su composición ó el proceso de mezclado, teniendo como meta obtener mejorar la resistencia del concreto y al mismo tiempo tener mayores posibilidades de analizar el comportamiento de las mismas. Los resultados obtenidos en las tres mezclas realizadas se observan en la tabla 7.3.2. Como se puede observar estos difieren en gran medida a los encontrados en la investigación.

<sup>94</sup> Elaborada en base al reporte de GONZÁLEZ ISABEL, op. cit., pág. 100.



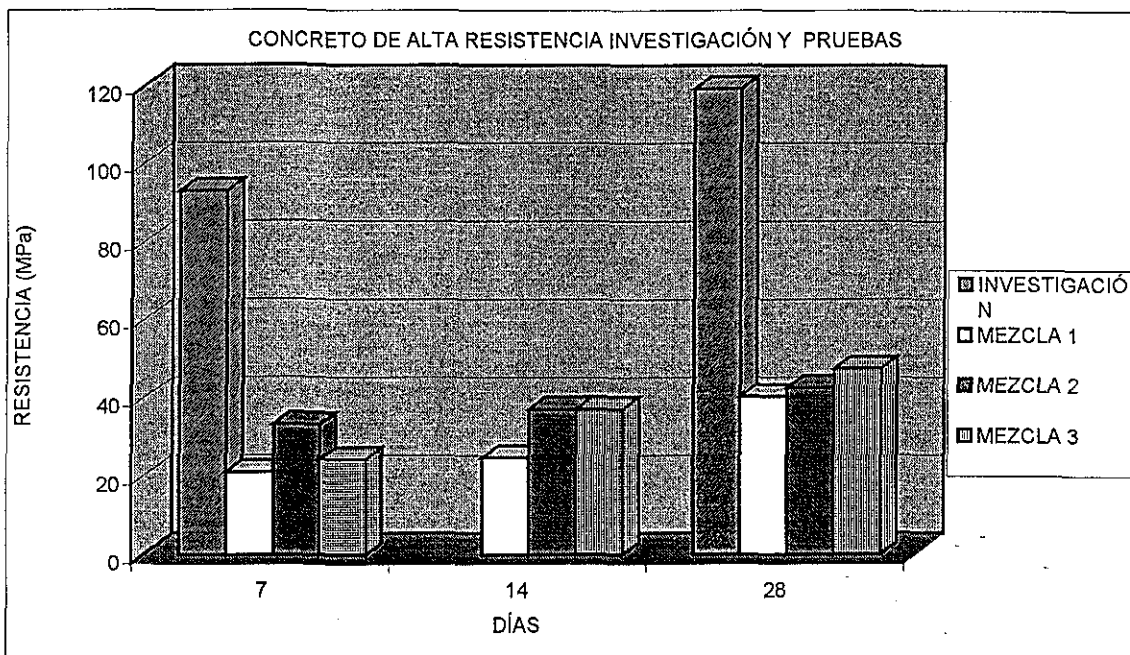
Tiempo de ensaye mezcla1	Resistencia a la compresión en MPa
7 días	21
14 días	24.7
28 días	40.4

Tiempo de ensaye mezcla 2	Resistencia a la compresión en MPa
7 días	33
14 días	37.2
28 días	42.7

Tiempo de ensaye mezcla 3	Resistencia a la compresión en MPa
7 días	24.3
14 días	37.2
28 días	47.6

Tabla 7.3.2. – Resultados al esfuerzo de compresión de la mezcla de "prueba"<sup>Ⓞ</sup>

De acuerdo a como se presentaron los resultados de la mezcla de "prueba" se ve que no fue necesario llevar los ensayos a tiempos mayores de 28 días, porque la resistencia obtenida no alcanzaba ni el 50% de las encontradas previamente por el investigador, gráfica 7.3.1., en ninguno de los tres casos.



Gráfica 7.3.1. – Resistencia del concreto de alta resistencia reportada en artículos de investigación y resultados obtenidos en la mezcla "prueba"<sup>Ⓟ</sup>

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

<sup>Ⓟ</sup> Elaboración propia en base a los resultados de González Isabel y los experimentales obtenidos en el laboratorio.

Es de importancia recalcar que se estableció una técnica de mezclado, apéndice 1, y se le efectuó posteriormente un cambio; los resultados de resistencia obtenidos están en la tabla 7.3.2., anteriormente ilustrada, mismos que como ya se indicó, no son satisfactorios con relación a la resistencia final obtenida. La variación de la primera mezcla con respecto a la segunda consistió en que se le añadió un aditivo plastificante, observándose en esta última (mezcla 2) un mejor mezclado y un aumento de resistencia. Finalmente se realizó una tercera mezcla, a la cual se le cambió únicamente a la segunda mezcla la técnica de mezclado, consistente en variar la secuencia de mezclado, los resultados obtenidos se presentan en la misma tabla (mezcla 3) y como se observa, indican una mejor resistencia a los 28 días.

Los resultados obtenidos, sin lugar a duda, no causaron ningún asombro, por el contrario se esperaban, porque como se mencionó en un capítulo anterior, no se indica el tipo ni la calidad de los agregados fino y grueso, el o los componentes químicos principales de los aditivos, o en algunos casos la metodología empleada para el mezclado y por último las características químicas principales del cemento.

Además de las razones anteriormente mencionadas, no se debe olvidar que los resultados presentados de la resistencia a compresión son de dosificaciones que se estaban elaborando con materiales existentes en otro país, cuyas características son muy diferentes de los que se tienen en México, y son los que se ocuparán para iniciar la investigación. Sin embargo, al efectuar estas tres mezclas dejaron resultados positivos ya que se pudo percibir que los cambios en las técnicas y los componentes finales del mezclado afectan el incremento de la resistencia en forma distinta, estas variaciones de resistencia se ven reflejadas en la gráfica 7.3.1.

Por los resultados obtenidos y la falta de información tanto en la dosificación empleada y de todas las ilustradas en el capítulo anterior, así como de lo

mencionado en el párrafo anterior, se consideró que no era posible seguir trabajando con la mezcla de "prueba", o con otra similar, por lo cual se tenía que determinar una que, además de poder efectuar los cambios adecuados para favorecer el aumento de resistencia a la compresión, se tuviera un mejor conocimiento de las características propias de los componentes del concreto.

Para poder llegar al establecimiento de las cantidades de los materiales, se consideró iniciar con una mezcla que se le denominó "base", es decir, una dosificación en la que únicamente intervinieran los materiales de un concreto convencional, en otras palabras que no intervinieran en el mezclado ningún tipo de aditivo, pero procurando encontrar altas resistencias.

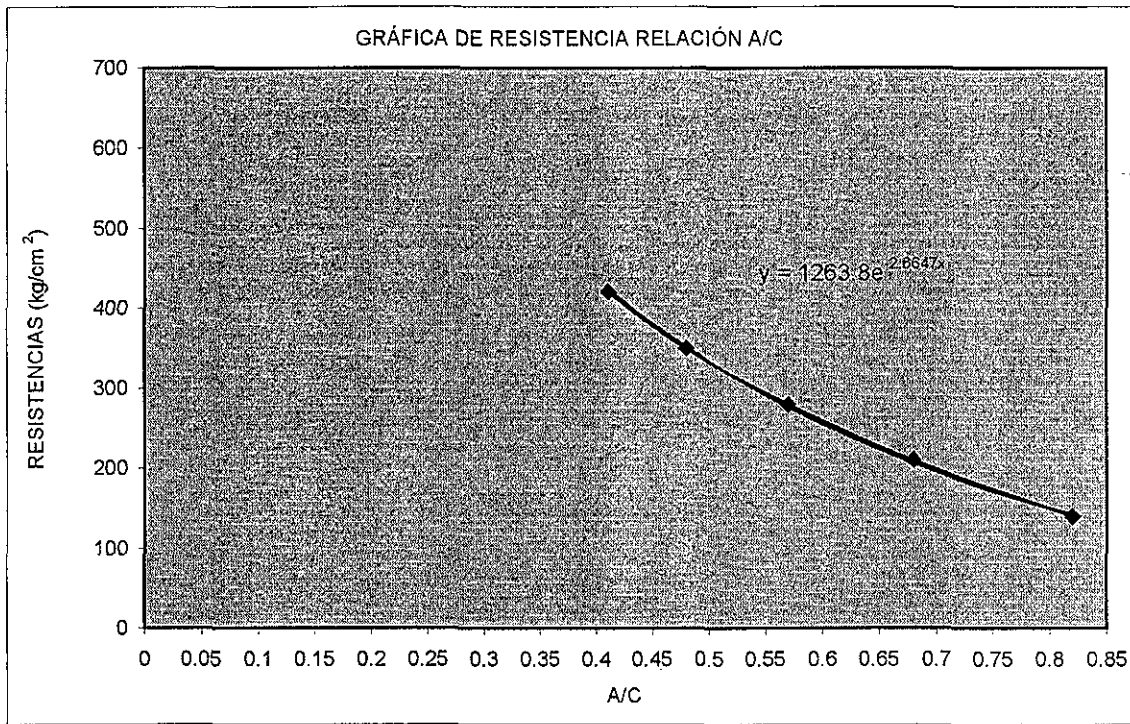
El cálculo de la mezcla "base", que se denominará de aquí en adelante como "dosificación base", se determinaría mediante el procedimiento del "proporcionamiento de mezclas del comité del ACI 211.1."<sup>95</sup>, lo más relevante de su utilización será el empleo de la tabla que contiene las relaciones agua/cemento, porque el objetivo principal es encontrar un concreto con una resistencia alta, y en ella sólo se tienen concretos hasta 420 kg/cm<sup>2</sup>.

Para lograr mejores resultados se empleó una hoja de cálculo, se transcribió la información necesaria y así con la ayuda de ella obtener una gráfica (7.3.2.), y al mismo tiempo obtener una fórmula y efectuar la extrapolación que ayudará a lograr el objetivo de encontrar el proporcionamiento de los materiales de la mezcla.

Con la fórmula encontrada  $y=1263.8 e^{-2.6647x}$  se determinaron para diferentes relaciones a/c la resistencia correspondiente, por ejemplo las indicadas en la tabla 7.3.3., los resultados se encuentran reflejados en la gráfica 7.3.3., donde se puede apreciar la línea de tendencia de la curva.

---

<sup>95</sup> "Standar Practice for Selecting... op. cit., pág. 24.



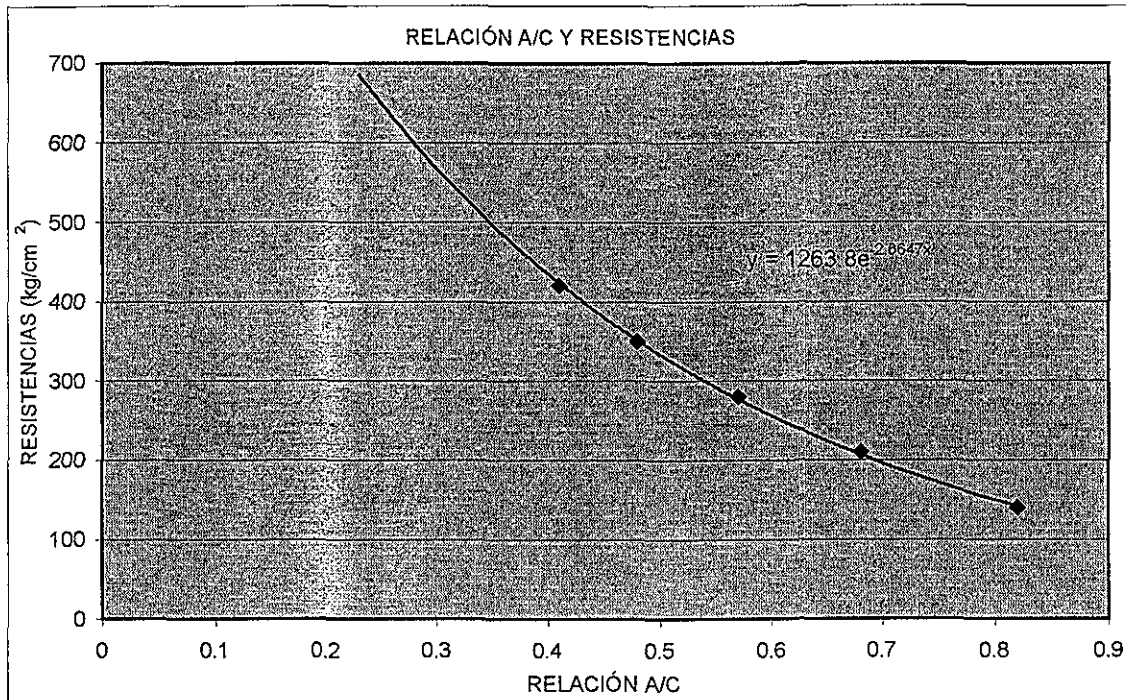
Gráfica 7.3.2. – Relaciones A/C y resistencias del A.CI.211<sup>x</sup>.

Relación a/c	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
.39	447.02
.37	471.51
.35	497.32
.33	524.54
.30	568.20
.27	615.48
.25	649.18

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 7.3.3.- Diferentes resistencias de acuerdo a la relación agua/cemento<sup>x</sup>.

<sup>x</sup> Elaboración propia en base al os datos de “Standar Practice for Selecting... op. cit., pág. 24.



Gráfica 7.3.3. – Resistencias extrapoladas con base en las relaciones a/c del A.C.I. 211.1<sup>x</sup>

Con ayuda de las tablas, incluyendo la de la extrapolación, se efectuaron los cálculos para determinar las cantidades de los materiales de la “dosificación base”, mismas que se encuentran en el apéndice 1.

Paralelamente a la realización de los cálculos de la “dosificación base” y por la inquietud de comenzar a fabricar concretos de alta resistencia y de tener la plena certeza de cual marca de cemento proporcionaría los mejores resultados, se procedió a la elaboración de una mezcla, fuera del programa establecido, a la cual se le denominó como “dosificación propuesta” para ella se utilizaron las mismas cantidades de materiales, iguales procedimientos de mezclado y como variante la marca del cemento.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>x</sup> Elaboración propia en base al os datos de “Standar Practice for Selecting... op. cit., pág. 24.

Cabe mencionar que la “dosificación propuesta”, contemplada en el apéndice 1, fue motivada por la inspiración e imaginación personal y con el fin de verificar los efectos finales de utilizar una u otra marca de cemento, y si los resultados correspondían con los de los morteros obtenidos, es importante hacer notar que se utilizaron los materiales tal y como llegaron del banco, y que ya se consideran todos los ingredientes que componen el concreto de alta resistencia. Los resultados de las resistencias de estas mezclas se encuentran reflejados en la tabla 7.3.4., y así finalmente saber cual de ellas proporcionaría un mejor resultado con relación a la resistencia final a compresión del concreto, sin menoscabo de poder posteriormente efectuar alguna variación que ayudará a obtener un mejor resultado al respecto.

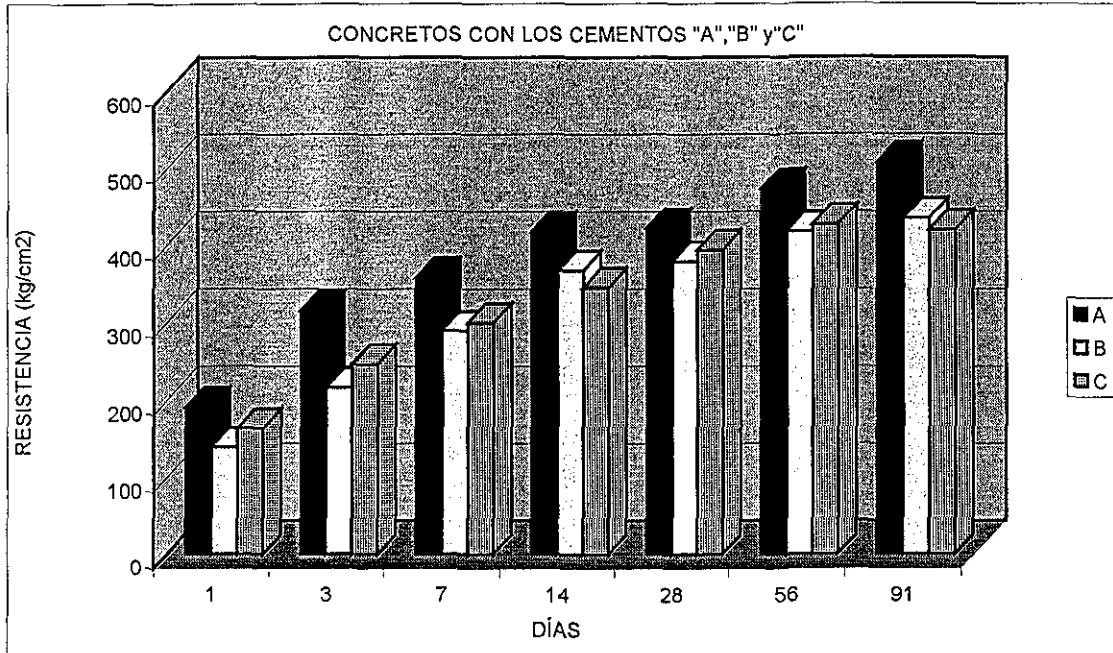
Concreto	1 Día kg/cm <sup>2</sup>	3 Días kg/cm <sup>2</sup>	7 Días kg/cm <sup>2</sup>	14 Días kg/cm <sup>2</sup>	28 Días kg/cm <sup>2</sup>	56 Días kg/cm <sup>2</sup>	91 Días kg/cm <sup>2</sup>
A	190.75	315.15	359.76	417.59	421.96	473.51	508.34
B	139.08	216.14	290.11	368.03	379.59	417.94	435.05
C	163.81	246.60	299.92	345.87	393.97	427.08	419.52

Tabla 7.3.4. – Resistencia promedio de los concretos elaborados con los cementos “A”; “B”; y “C”<sup>Φ</sup>.

Finalmente como se puede observar en la gráfica 7.3.4. la mezcla que mejores resultados presenta es la que contiene el cemento denominado como “A”, los cuales corresponden con los resultados obtenidos de los morteros.

Satisfecha la inquietud y con la certeza de que efectivamente se estaba empleando el mejor cemento de los que se tenían a disposición, se continuó trabajando en el cálculo de las cantidades de los materiales de la “dosificación base” de concreto normal, las cantidades correspondientes a los cálculos realizados, apéndice 1, se encuentran reflejados en la tabla 7.3.5.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio.



Gráfica 7.3.4. – Resistencias de los concretos elaborados con los cementos "A", "B" y "C"<sup>Φ</sup>.

MATERIAL	CANTIDAD	
	kg.	dm <sup>3</sup>
AGUA	194.00	194.00
AIRE	--	15.00
CEMENTO	705.45	223.95
AGREGADO GRUESO	770.81 <sup>α</sup>	273.82
AGREGADO FINO	668.56 <sup>Δ</sup>	293.23
TOTAL	2338.82	1000.00

Tabla 7.3.5. Cantidad de materiales empleados en la "dosificación base"<sup>Φ</sup>.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio.

<sup>α</sup> Materiales en estado saturado superficialmente seco

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Con la información obtenida se efectuó la elaboración de la mezcla de la "dosificación base" con el objeto de verificar si efectivamente se tenía una alta resistencia a la compresión axial y de ser así tenerla como referencia inicial.

En caso de que las resistencias obtenidas sean satisfactorias, las mezclas que se efectuarán posteriormente deberán ya incluir los aditivos químicos (superfluidificantes) y minerales (microsílica) que se contemplan en los concretos de alta resistencia.

Las resistencias promedio de la "dosificación base" se encuentran reflejadas en la tabla 7.3.6., en ella se puede percibir que las resistencias obtenidas fueron satisfactorias desde el momento en que se alcanzaron resistencias mayores a 420 kg/cm<sup>2</sup>, para mejor visualización de este efecto se presenta en la gráfica 7.3.5. Es importante hacer notar que se tuvo un especial cuidado en que el agregado grueso cumpliera con la granulometría indicada por la norma, además se lavó para quitarle parte del material arcilloso que tenía.

TIEMPO	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	389.30	430.00	454.67	517.93	528.78

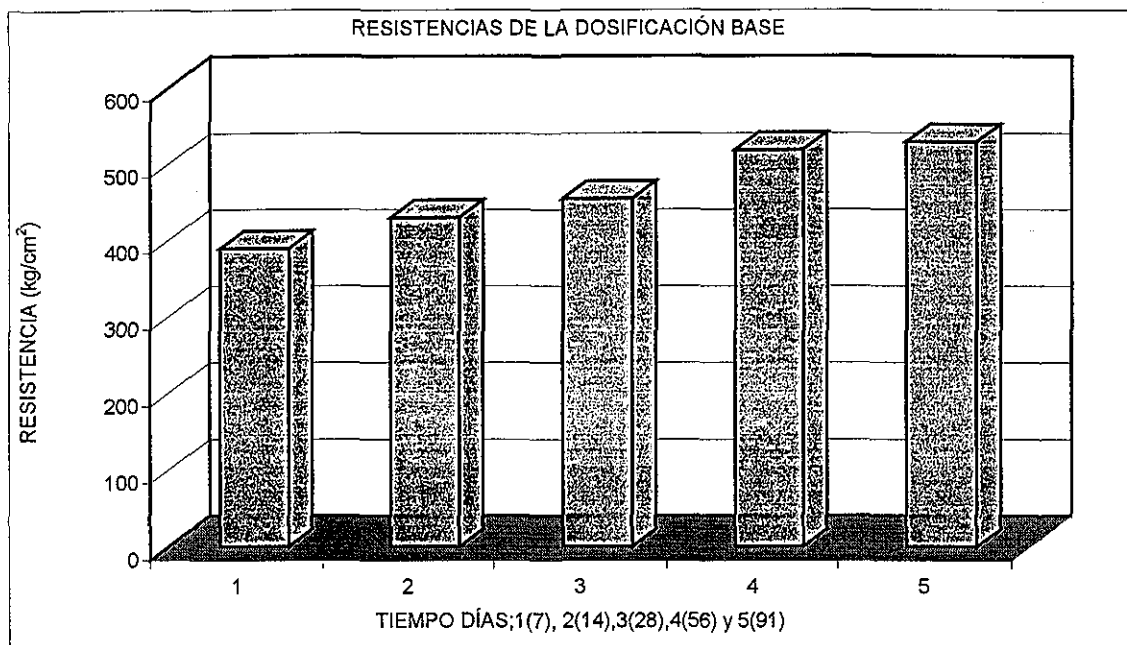
Tabla 7.3.6. – Resistencias promedio de la "dosificación base" elaborada<sup>o</sup>.

Por lo mencionado en el párrafo anterior se procedió en primer lugar a añadir los materiales que le proporcionarán una mayor resistencia a la "dosificación base", y posteriormente realizar una serie de mezclas en las cuales se fueran modificando las cantidades de los materiales o los procedimientos que intervienen en el de mezclado.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>o</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio.





Gráfica 7.3.5. –Resistencias a los 7, 14, 28, 56 y 91 días de la "dosificación base"<sup>Φ</sup>.

A partir de la "dosificación base", existen dos posibilidades para realizar la primera mezcla, una es quitar cierta cantidad de cemento y sustituirlo con el aditivo mineral y la segunda consiste en adicionar este último sin retirar cemento. Se decidió añadirle los aditivos químicos y minerales a las cantidades obtenidas en la "dosificación base" quedando integrada por lo tanto como se indica a continuación<sup>Φ</sup>:

MATERIAL	CANTIDAD (Kg)
AGUA	194.00
AIRE	--
CEMENTO	705.45
AGREGADO GRUESO	770.81 <sup>α</sup>
AGREGADO FINO	668.56 <sup>α</sup>
ADITIVO QUÍMICO	6.42 (lt)
MICROSÍLICA	105.82

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el laboratorio.

<sup>α</sup> Materiales en estado saturado superficialmente seco

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Como se observa en la tabla anterior se encuentran las cantidades adicionadas de los aditivos, el químico fue a razón de 910ml por cada 100 kg de cemento y el mineral se efectuó en relación al 15% del peso de cemento. Es importante indicar que utilizó el material pétreo tal y como se encontraba en el banco de materiales y que no se redujo la cantidad de agua, como se recomienda al utilizar el tipo de aditivo químico que se está empleando, porque como se indica se está añadiendo la microsíllica que también va a absorber agua.

Al realizar la mezcla, dándole el nombre de "A", con las cantidades indicadas en peso, para obtener cuando menos treinta y seis cilindros de 30 x 15 cm. , alto y diámetro respectivamente, es decir, aproximadamente 200.4 litros de concreto, en dos procesos de mezclado, de acuerdo con la capacidad del trompo, o sea, de 100.2 litros cada uno de ellos. Previendo que por la inclusión de la microsíllica que es un material muy absorbente se necesitaría más agua se le añadió el 65% más del aditivo químico que le correspondía, con el objeto de no modificar mucho la relación agua/cemento, sin embargo, se le tuvo que añadir aún a cada uno de los mezclados la cantidad de cuatro litros de agua porque se presentó una mezcla demasiado árida, inducida probablemente por la microsíllica y/o también por el orden en que se colocaron los materiales al realizar la mezcla.

Los materiales se colocaron en el "trompo" de acuerdo al siguiente orden:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Agregado fino (arena)
4. Cemento
5. Microsíllica
6. Agua (85%)
7. Aditivo químico
8. Cuatro litros de agua adicionales a la calculada para la mezcla.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Los resultados de las resistencias de cada uno de los cilindros ensayados en las fechas predeterminadas de 24 horas, tres días, siete días, catorce días,

veintiocho días, cincuenta y seis días y noventa y un día se encuentran relacionadas en las tablas del apéndice 2, se determinaron estos tiempos porque se consideró que algunos concretos adquieren verdaderas resistencias a tempranas edades y otros la adquirirán a través del tiempo, los promedios de las resistencias en los periodos mencionados se encuentran en la tabla 7.3.7.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	267.21	368.54	435.00	485.17	529.35	564.59	550.82

Tabla 7.3.7.- Resistencias promedio de la mezcla "A" realizada a partir de la "dosificación base"<sup>Φ</sup>

Si se comparan los resultados obtenidos en las dos mezclas realizadas, es decir, la "dosificación base" sin aditivos y esta primera mezcla llamada "A", que contiene los aditivos considerados, se observa que en ésta última (tabla 7.3.8) hubo un incremento de resistencia principalmente a edades tempranas siendo la máxima a los 28 días y disminuyendo posteriormente dicho incremento. Por lo cual se puede deducir que al añadir los aditivos se obtiene un incremento de resistencia.

TIEMPO	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
INCREMENTO DE RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	45.7	55.17	79.98	46.66	22.04

Tabla 7.3.8.- Incremento de la resistencia en la mezcla que contiene los aditivos químico y mineral<sup>Φ</sup>.

Se realizó otra mezcla ("B"), con las mismas cantidades anteriormente empleadas, teniendo como objetivo verificar si se afecta la resistencia al mejorar las condiciones físicas del agregado grueso, es decir, lavarlo para quitarle material arcilloso que traía pegado en sus paredes y también mejorar la

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

granulometría del mismo, mediante un cribado se procedió a mantener las cantidades adecuadas según lo indica las normas mexicanas NOM-C-77<sup>96</sup> y la NOM-C-111<sup>97</sup>, el orden de mezclado de los componentes del concreto fue el mismo que el de la mezcla "A", se tuvo especial cuidado con el contenido de humedad de los agregados. Los resultados de la mezcla realizada (treinta y seis cilindros) se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de ellos en las fechas predeterminadas se indican en la tabla 7.3.9

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	258.32	331.62	403.48	454.23	508.32	557.43	559.66

Tabla 7.3.9.- Resistencias promedio de la mezcla "B" donde el agregado grueso se lavo y cribó<sup>Ø</sup>.

En relación con la mezcla anterior se puede observar que no aumentó la resistencia y si se disminuyó a edades tempranas, sin embargo, las resistencias a mayores edades las mantuvo uniformes sin tener el decremento que mostró la mezcla anterior. Es importante indicar que el revenimiento de ambas mezclas era aproximadamente de tres centímetros.

Los resultados obtenidos muestran que se estaba siguiendo un buen camino para lograr una mezcla de concreto con resistencias superiores al añadir los aditivos mencionados y al mejorar las condiciones físicas del agregado grueso. Sin embargo, se debe de contemplar la economía de las mezclas que se están elaborando, por esta razón se redujo la cantidad del aditivo químico en la cantidad que se había añadido (65%) dejándolo finalmente en el 50% del que correspondía a la cantidad de cemento, con ello la relación agua/cemento disminuyo ligeramente.

<sup>96</sup> FERNANDEZ O. León., op. cit., págs. 25 – 29.

<sup>97</sup> Ibid., págs. 47 – 63.

<sup>Ø</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Se efectuó la mezcla denominada como "C", en ella se consideró tener el agregado grueso con una buena granulometría (NOM-C-111), lavarlo para quitarle la parte arcillosa y reducir la cantidad de aditivo químico como se había señalado en el párrafo anterior, es decir, el 50% del que le correspondía con relación al peso del cemento, las demás cantidades se consideraron iguales teniendo en cuenta los cálculos por humedad de los agregados grueso y fino. El procedimiento de añadir los elementos en el trompo se modificaron un poco porque se consideró que al momento de añadir el cemento y enseguida la microsíllica que absorbe demasiada agua en un lapso breve de tiempo por ser ambos materiales de alta capacidad de absorción quedando el orden de colocación de acuerdo como se indica a continuación:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Microsíllica
4. Agua (20%)
5. Agregado fino (arena)
6. Cemento
7. Agua (65%)
8. Aditivo químico

Las cantidades de los materiales fueron los que finalmente se emplearon en la mezcla "A", exceptuando el aditivo químico que se redujo. Al realizar el mezclado de los materiales se vio que nuevamente se presentaba una consistencia muy árida, por ello se tuvo la necesidad de agregar un litro de agua y aumentar el tiempo de mezclado para tratar de reducir el efecto presentado. El revenimiento obtenido fue de 1.8 centímetros. Los resultados de cada uno de los cilindros ensayados se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de ellos en la tabla 7.3.10.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	268.32	364.11	442.28	507.40	545.5	610.38	581.00

Tabla 7.3.10.- Resistencias promedio de la mezcla "C"<sup>Φ</sup>.

Si se observan los resultados de esta última mezcla se puede notar que la reducción del aditivo químico no disminuyó la resistencia tardía del concreto e incluso se ve que aumentó ligeramente. A ciencia cierta no se puede señalar si la causa del aumento de resistencia fue por el cambio del proceso de mezclado aunque a priori así pareciera.

Con las cantidades empleadas en la mezcla "C" se procedió a realizar una nueva prueba, llamada "D", cambiando el orden de los componentes al colocarlos en el trompo, teniendo cuidado con la cantidad de agua (un litro) añadida anteriormente, ya que existe la posibilidad que con el cambio del orden de mezclado no se presente el estado árido manifestado anteriormente.

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Microsilica
4. Agua (25%)
5. Cemento (50%)
6. Agregado fino (arena)
7. Agua (20%)
8. Cemento (50%)
9. Agua (30%)
10. Aditivo químico diluido en el 10 % sobrante de agua

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Se procedió con el mezclado con un tiempo similar al de la mezcla "C" y se requirió únicamente de medio litro de agua, es decir, medio litro menos que la empleada con anterioridad, con ello se redujo la relación agua/cemento, aumentando así la posibilidad de obtener resistencias aún mayores. El revenimiento que se obtuvo es de dos centímetros. Los resultados de la resistencia de cada uno de los cilindros se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de ellos se encuentra indicado en la tabla 7.3.11.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	272.11	403.48	436.79	486.23	509.91	571.37	661.93

Tabla 7.3.11.- Resistencias promedio de la mezcla "D"<sup>Φ</sup>.

Se ve en los resultados que se incrementó la resistencia de la mezcla "D", en principio se puede mencionar que es por que hubo una reducción en la relación agua/cemento, aunque también pudo ser motivado en parte por el cambio de orden de los elementos al ser mezclados.

Hasta el momento se encontraban resistencias cada vez mayores, pero a su vez existen varias interrogantes con respecto a lo que ocurría con los resultados obtenidos. Para tratar de tener una mayor información de lo ocurrido se tomó la mezcla "C" como referencia y se elaboró una nueva mezcla que se le denominará como mezcla "E", para ello se mantuvo la secuencia establecida (mezcla "C"), cambiando la cantidad de aditivo químico suministrado al doble, es decir, la que le toca originalmente con relación al peso de cemento y procurando mantener la cantidad de agua calculada ("dosificación base"), para tratar de conocer si la cantidad de aditivo químico había tenido algún efecto relevante en la mezcla "C". Se realizó la mezcla "E" obteniendo como resultados, apéndice 2, que las resistencias fueron sensiblemente mayores a partir del séptimo día,

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

como se puede observar en las resistencias promedio los mostrados en la tabla 7.3.12., pero ello implicó un mayor consumo de aditivo químico, sin embargo, la cantidad de agua fue suficiente y dio un revenimiento aproximadamente de dos centímetros.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	225.32	359.39	444.13	514.56	570.71	592.74	610.61

Tabla 7.3.12.- Resistencias promedio de la mezcla "E"<sup>Φ</sup>.

Al utilizar menor cantidad de agua se disminuyó la relación agua/cemento originando con ello la posibilidad de aumentar la resistencia del concreto fabricado, el resultado correspondió plenamente a esta posibilidad, por otra parte también se comprobó la efectividad del aditivo químico con relación a la función de que es un sustituto del agua.

Se consideró conveniente realizar otra prueba con las cantidades empleadas en la mezcla anterior ("E"), cambiando el procedimiento de la colocación de los ingredientes en el "trompo" para visualizar cual sería su comportamiento, a esta nueva mezcla se denominará con la letra "F", la secuencia del suministro de los componentes fue la siguiente:

1. Cemento
2. Microsílica
3. Agua (90%)
4. Aditivo diluido en agua (10%)
5. Agregado grueso (caliza)
6. Agregado fino (arena)

Las resistencias obtenidas de cada una de las probetas se encuentran en el apéndice 2. El promedio de los mismos, en las fechas preestablecidas, se

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.



indican en la tabla 7.3.13. Es importante indicar que en la mezcla se necesitaron cuatro litros más de agua, es decir, con el transcurso del tiempo la mezcla presentó una consistencia en formar de pasta seca que se adhería en la pared del trompo, por lo cual fue necesario despegarla con una barreta hasta el momento de colocarle la cantidad de agua indicada, el revenimiento que presento finalmente fue de un centímetro y medio.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	245.05	379.00	447.90	519.37	542.66	612.3	609.93

Tabla 7.3.13.- Resistencias promedio de la mezcla "F"<sup>Φ</sup>.

Por lo ocurrido en las mezclas se puede mencionar que dependiendo del orden en que son colocados los materiales para el mezclado, afecta tanto la trabajabilidad del concreto como las resistencias que se obtienen en los diferentes periodos de tiempo.

Los resultados obtenidos hasta el momento hacen suponer que la microsíllica absorbe una buena cantidad de agua, también que el orden de colocación de los elementos en el "trompo" han afectado la trabajabilidad en la mezcla y finalmente se ha variado la resistencia a compresión del concreto, para tratar de poder demostrar lo anterior se tendría que realizar una serie de mezclas. Primero reduciendo la cantidad de microsíllica y manteniendo el mismo proceso de mezclado. Y posteriormente cambiando el procedimiento empleado y así poder comparar los resultados obtenidos. Como no se está en posibilidades de realizar varias mezclas se determinó realizar una sola mezcla reduciendo la cantidad de microsíllica y cambiando el orden de mezclado rotulándola con la letra "G". Los resultados de cada uno de los cilindros se encuentran en el apéndice 2 y los promedios se encuentran ilustrados en la tabla 7.3.14

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	182.96	369.61	365.41	495.27	521.77	587.04	607.23

Tabla 7.3.14.- Resistencias promedio de la mezcla "G"<sup>Φ</sup>.

La cantidad de microsíllica utilizada fue el 10% con relación al peso del cemento y el orden de mezclado el siguiente:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Microsíllica
3. Agua (45%)
4. Cemento (50%)
5. Agregado fino (arena)
6. Agua (45%)
7. Cemento (50%)
8. Aditivo mezclado con el 10% de agua faltante

Al realizar el mezclado se presentó una consistencia un tanto árida por lo cual se requirió agregar dos litros más de agua, el revenimiento obtenido es de dos centímetros. Como se observa en los resultados, tabla 7.3.14, se presentaron variaciones en las resistencias obtenidas con las dos mezclas anteriores ("E" y "F") sobre todo en las primeras edades, aunque finalmente las resistencias a los 56 y 91 días son muy similares a pesar que se redujo la cantidad de microsíllica.

Las observaciones señaladas al parecer indican que el orden con el cual se colocan los elementos, para realizar el mezclado, tiene importancia en los resultados obtenidos. Por la razón anterior se considera conveniente emplear el orden de colocación de los elementos que mejores resistencias se habían

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

presentado en las mezclas de concreto realizadas, para poder seguir variando algún elemento que produjera incremento en la resistencia del concreto, para ello se elaboraron dos nuevas mezclas, en la primera se le aumentaría más aditivo químico (50%) conservando todas las demás cantidades empleadas en las mezclas y en la segunda la misma cantidad anterior de aditivo químico pero reduciendo la microsíllica al 10%, para ver que pasa con los concretos fabricados y con ello analizar los resultados. El mejor procedimiento de mezclado empleado hasta el momento es el siguiente:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Microsíllica
4. Agua (25%)
5. Cemento (50%)
6. Agregado fino (arena)
7. Agua (20%)
8. Cemento (50%)
9. Agua (30%)
10. Aditivo químico diluido en el 10 % sobrante de agua

Los resultados de los concretos elaborados (se encuentran en el apéndice 2) que se mencionaron anteriormente se les identificó con las letras "H" e "I" y el resumen de ellos en las tablas 7.3.15. y 7.3.16. respectivamente.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	16.97	365.94	433.70	493.23	549.30	590.53	621.32

Tabla 7.3.15.- Resistencias promedio de la mezcla "H"<sup>Φ</sup>.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	122.51	250.27	389.70	451.14	481.34	523.51	558.53

Tabla 7.3.16.- Resistencias promedio de la mezcla "I"<sup>Φ</sup>.

Los revenimientos de las mezclas se vieron incrementados en un centímetro con respecto a las anteriores mezclas, es decir, tuvieron tres centímetros de revenimiento. En relación con estas dos mezclas se puede mencionar que la única diferencia entre ambas es la cantidad de microsilica. Los resultados indican que la consecuencia es el incremento de resistencia que existe en la denominada "H" con respecto a la "I", 15% y 10% de microsilica respectivamente. Si efectivamente en ello consiste la diferencia entre ambos concretos se comprueba que las pruebas efectuadas con los morteros con diferentes cantidades de microsilica se reflejan también al fabricar concretos.

A pesar que se encontraron resistencias mayores a las obtenidas en la "dosificación base" seguía persistiendo el problema de la trabajabilidad del concreto, para tratar de dar una solución a éste se decidió efectuar otra serie de mezclas en las que se adicionará un aditivo que le proporcionará características de trabajabilidad al concreto.

Las siguientes mezclas se elaboraron a partir de la denominada con la letra "D", pero se le adicionó otro aditivo químico, de tal forma que ambos aditivos fueran como mínimo el 100% del que se le aplica a la mezcla, los cambios realizados se indicarán en cada una de las mezclas.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

La primera mezcla se le denominó con la letra "J", en esta únicamente se le añadió el 50% del aditivo faltante para tener el 100% con relación al peso del cemento según se indica en la "dosificación base" con aditivos, el aditivo químico es conocido o llamado Rehoplástico el que proporciona al concreto características de mayor trabajabilidad y posiblemente de un mayor revenimiento. Los resultados de las resistencias de cada uno de los cilindros elaborados se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de ellos se ilustran en la tabla 7.3.17 que se muestra a continuación.

TIEMPO	1	3	7	14	28	56	91
	DÍA	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )			466.47	465.28	549.47	607.55	666.59

Tabla 7.3.17.- Resistencias promedio de la mezcla "J".<sup>Φ</sup>

En esta mezcla el revenimiento alcanzado fue prácticamente el mismo que el de la mezcla "D" pero el concreto tenía una consistencia más plástica, es decir, más trabajable lo cual permitía manipularlo sin dificultad, mantuvo esta consistencia durante los primeros tres días por ello no se realizaron las pruebas correspondientes de compresión axial, sin embargo, se incrementó la resistencia a mayores edades.

A la segunda mezcla llamada "K" se le añadió el 100% del aditivo rehoplástico en lugar del 50% empleado anteriormente, conservando el aditivo superfluidificante en el 50%, los materiales se utilizaron de acuerdo a como se encontraban en el almacén, es decir, no se les dio el tratamiento previo de lavado ni cribado, con el objeto de abatir costos. Los resultados del ensaye de los cilindros se encuentra en el apéndice 2 y los promedios de los mismos en la tabla 7.3.18 que se ilustra a continuación.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	225.06	353.08	407.07	506.19	554.67	565.19	600.00

Tabla 7.3.18.- Resistencias promedio de la mezcla "K"<sup>Φ</sup>.

La trabajabilidad de la mezcla se mantuvo en el mismo rango, en esta ocasión aunque existía un estado plástico en el concreto fue posible realizar los ensayos correspondientes a las primeras edades que, como se puede observar, son grandes, sin embargo, en comparación con la mezcla anterior se redujo su resistencia a edades mayores. No hay que olvidar que los agregados grueso y fino no se les dió ningún tratamiento especial, es decir, no se lavaron ni cribaron.

La tercera mezcla denominada con la letra "L", ésta se realizó aumentando al 100 % el aditivo químico inicialmente empleado y el 50% del aditivo rehoplastico, las condiciones físicas de los materiales son similares a las de la mezcla "K". Los resultados de cada cilindro ensayado se encuentran reflejados en las tablas del apéndice 2, y los promedios de los mismos en la tabla 7.3.19. que se muestra a continuación:

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	266.66	370.91	415.68	550.12	585.67	602.77	623.21

Tabla 7.3.19.- Resistencias promedio de la mezcla "L"<sup>Φ</sup>.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Se puede observar que se incrementaron las resistencias de los cilindros en todas las edades, el revenimiento que presentó la mezcla también fue de dos centímetros, sin embargo, es un problema que se tiene que resolver.

Finalmente se realiza una cuarta mezcla en la cual ambos aditivos se adicionan en un 100% con relación al peso del cemento, las demás cantidades de los materiales se mantienen constantes y con las condiciones físicas similares a las dos últimas mezclas, a ésta se le denominó con la letra "M", los resultados de los cilindros se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de los mismos en la tabla 7.3.20. En principio como se está aumentando al doble la cantidad de aditivos químicos, se considera conveniente retener en un 10% el agua que se va a añadir en la mezcla.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	23.35	141.18	408.84	547.28	597.08	636.83	708.73

Tabla 7.3.20.- Resistencias promedio de la mezcla "M"<sup>Ⓞ</sup>.

Se nota que se incrementó la resistencia a partir de los veintiocho días, el revenimiento continuó del orden de los dos centímetros pero en este caso existe la posibilidad de que la razón es la reducción del 10 % de agua, ocasionando con ello una relación agua/cemento menor y por ende una mayor resistencia de acuerdo con lo mencionado por los investigadores.

Se consideró oportuno en este momento realizar un cambio del agregado grueso (caliza) por otro similar, ya que se cuadruplico el aditivo químico, pero que tuviera mejores características de limpieza, es decir, que no tuviera material arcilloso adherido como el utilizado hasta el momento. Las propiedades de este nuevo material si bien no son iguales al empleado en un inicio si son muy

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

semejantes. Tomando las proporciones de los materiales empleadas en la mezcla "M" y el mismo procedimiento de mezclado se elaboró un nuevo concreto al que se le denominó con la letra "N". Los resultados de las resistencias de cada uno de los cilindros fabricados se encuentran en el apéndice 2 y el resultado promedio se muestran en la tabla 7.3.21.

TIEMPO	1	3	7	14	28	56	91
	DÍA	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )			440.01	530.26	547.51	637.85	679.13

Tabla 7.3.21.- Resistencias promedio de la mezcla "N"<sup>Φ</sup>.

Como se puede observar la resistencia final del concreto disminuyó, sin embargo, se tuvo una mejor trabajabilidad en el mismo, al tener un revenimiento de siete centímetros, es decir, se incrementaron cinco centímetros en relación con la mezcla anterior, razón por la cual en los tres primeros días no se realizaron los ensayos de compresión en los cilindros por presentar una consistencia aún plástica.

Por la experiencia adquirida, con las mezclas realizadas hasta el momento, se podía predecir que si se disminuía el agua se incrementaría la resistencia del concreto razón por la cual se consideró disminuirla en un 5%. Si se da como un hecho lo anteriormente mencionado se propone adicionalmente cambiar las cantidades del agregado grueso y del fino, el primero incrementarlo en un 15% y el segundo disminuirlo en la misma cantidad, ambos en relación a su peso, considerando que se recomienda mayor cantidad de agregado grueso que fino para concretos de alta resistencia.

Con los cambios mencionados se realizó una nueva mezcla la cual se le denominó con la letra "O". Los resultados obtenidos de cada uno de los cilindros

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.



se encuentran en el apéndice 2 y el promedio de las resistencias de ellos se ilustran en la tabla 7.3.22. Sin olvidar que las cantidades de los aditivos químicos empleados fueron los mismos que los de la mezcla "N".

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	178.05	374.14	485.44	546.24	632.34	673.97	731.90

Tabla 7.3.22.- Resistencias promedio de la mezcla "O"<sup>Φ</sup>.

La resistencia del concreto se incrementó como se ve en la tabla anterior y el revenimiento de la mezcla se conservó en el rango de los siete centímetros a priori podemos señalar que se tiene un concreto de alta resistencia, aunque no se ha logrado aún el objetivo inicial, sin embargo, si se puede indicar que se han obtenido mayores resistencias y mejor trabajabilidad en los concretos encontrados hasta el momento.

Teniendo en este momento una mezcla con buen revenimiento se consideró pertinente reducir la cantidad de agua en un 15% de la empleada en la mezcla "O", considerando que debía de haber un aumento en la resistencia a compresión de los cilindros que se fabricarán. A esta nueva mezcla se denominó con la letra "P". Los promedios de las resistencias obtenidas se encuentran en la tabla 7.3.23 y los resultados de las resistencias de cada uno de los cilindros ensayados en el apéndice 2.

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	419.71	460.78	608.54	634.62	662.98	743.01	782.79

Tabla 7.3.23.- Resistencias promedio de la mezcla "P"<sup>Φ</sup>.

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Las resistencias obtenidas en los primeros días son prácticamente comparables con las que actualmente se emplean en muchas construcciones. El revenimiento que se tuvo en la mezcla fue de dos centímetros, sin embargo, las resistencias en todas las edades alcanzaron un rango mayor al que se tenía en las mezclas precedentes.

Después de haber realizado todas las mezclas anteriores se consideró que se contaba con cierta experiencia para efectuar algunos cambios encaminados a que se aumentara la resistencia del concreto y probablemente el revenimiento de la mezcla.

Se determinó aumentar la cantidad del cemento en un 15% con su cantidad correspondiente de microsíllica, 15% del peso del cemento, considerando que este último material absorbe demasiada agua, se mantuvo el superfluidificante en la misma proporción y el aditivo químico rehoplástico se suministro al doble, además como se le agregaba demasiado material fino se le retiraría arena en la misma proporción en que se le agrego el cemento con la microsíllica, conservando la misma cantidad del agregado grueso de la mezcla anterior. A la mezcla se le denominó con la letra "Q", los resultados de cada cilindro en el tiempo de ensaye se encuentran en el apéndice 2 y los promedios de los mismos en la tabla 7.3.24.

TIEMPO	1	3	7	14	28	56	91
	DÍA	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS	DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )			619.37	645.66	711.25	759.19	801.06

Tabla 7.3.24.- Resistencias promedio de la mezcla "Q"<sup>Φ</sup>.

Los cambios realizados con base a la experiencia adquirida fueron acertados, se ve que hubo incremento en la resistencia y la mezcla presentó un aumento de

<sup>Φ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

un centímetro en el revenimiento. Es importante indicar que los ensayos del primer y tercer día no fue posible realizarlos por causas ajenas al proceso normal de las pruebas.

Finalmente se realizó una pequeña prueba con el basalto que se tenía en el almacén, se partió de los cálculos realizados para la "dosificación base", lo que vario fueron los valores del agregado grueso que se empleo en este caso, quedando la misma como se muestra en la tabla 7.3.25, se conservaron las cantidades de los aditivos químicos 50% y 50% con relación al peso del cemento, la microsilica se disminuyó al 10%, también se considero conveniente disminuir el agregado fino en un 40%, esto último porque se observo en los ejemplos precedentes que se logro un beneficio al ejecutar dicha variable.

MATERIAL	CANTIDAD	
	kg.	dm <sup>3</sup>
AGUA	194.00	194.00
AIRE	--	15.00
CEMENTO	705.45	223.95
AGREGADO GRUESO	621.17 <sup>Δ</sup>	378.92
AGREGADO FINO	428.94 <sup>α</sup>	188.13
TOTAL	1949.56	1000.00

Tabla 7.3.25. Cantidad de materiales empleados en la "dosificación base"<sup>Φ</sup>.

La cantidad de la mezcla solo fue para efectuar pruebas a los 28, 56 y 91 días, los resultados de cada uno de los cilindros se encuentra en el apéndice 2 y el promedio de la resistencia de ellos, en las fechas preestablecidas, en la tabla 7.3.26. Es importante indicar que en este caso también fue necesario adicionarle agua aproximadamente dos litros, la razón es similar a las anteriores, es decir, se presenta una consistencia árida, el revenimiento es de dos centímetros.

<sup>α</sup> Materiales en estado saturado superficialmente seco

TIEMPO	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )					732.52	775.34	806.12

Tabla 7.3.26.- Resistencias promedio de la mezcla con basalto<sup>Ⓞ</sup>.

Es posible que al seguir efectuando cambios en las variables que intervienen en el proceso de elaboración del concreto haya un mayor incremento en la resistencia, pero como se puede apreciar el encontrarlo puede ser muy lento. Por esta razón se considera que el trabajo realizado hasta el momento, aunque no se lograron resistencias muy superiores a los 800 kg/cm<sup>2</sup>, es suficiente tanto por la cantidad de mezclas realizadas y la experiencia que se deja para seguir experimentado en la obtención de concretos de alta resistencia.

Es oportuno indicar que se presentaron problemas, en el momento de efectuar los ensayos a compresión en los concretos de resistencia mayores a 500 kg/cm<sup>2</sup>, se consideró que la causa podía ser que el material con el que se realizaba el cabeceo de los cilindros no era lo suficientemente resistente para soportar las cargas a las que se sometía el cilindro de concreto. Razón suficiente para efectuar pruebas para encontrar un material que tuviera un mejor comportamiento a esas resistencias.

El procedimiento que se empleo para encontrar un mejor material se basa en la norma DGN-C-109<sup>98</sup> que se emplea en la comprobación de la resistencia del material de cabeceo para cilindros de concreto. Se utilizaron materiales tales como; polvo de tabique rojo recocido, microsílca y arena cernida por la malla N° 100. Los resultados promedio obtenidos de cada serie de tres cubos se muestran en las siguientes tablas.

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

<sup>Ⓞ</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

<sup>98</sup> "Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto". NOM-C-109-1985. Dirección General de Normas. págs. 1-8.

Mezcla de Azufre con 15% en peso de polvo de tabique rojo					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	26.56	263.5	5619	211.56	
2	26.97	266.0	5501	203.97	
3	27.27	265.8	5661	207.59	207.71
Mezcla de Azufre con 20% en peso de polvo de tabique rojo					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	26.84	259.0	4932	183.76	
2	26.79	278.5	5255	196.16	
3	27.53	276.0	4835	175.63	185.18
Mezcla de Azufre con 25% en peso de polvo de tabique rojo					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	26.77	269.0	3901	145.72	
2	27.90	275.8	3884	139.21	
3	29.58	268.5	4380	148.07	144.33

Material para cabeceo azufre – polvo de tabique<sup>o</sup>

Mezcla de Azufre con 5% en peso de microsilica					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	27.73	265.0	7898	284.82	
2	26.97	267.5	7547	279.83	
3	27.12	267.0	7450	274.71	279.79
Mezcla de Azufre con 7% en peso de microsilica					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	27.26	270.0	7620	279.53	
2	26.97	267.0	7277	269.82	
3	27.54	268.6	7560	274.51	274.62
Mezcla de Azufre con 9% en peso de microsilica					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	26.09	251.5	6545	250.86	
2	25.70	246.8	6192	240.93	
3	26.47	257.0	6453	243.79	245.19

Material para cabeceo azufre – microsilica<sup>o</sup>

<sup>o</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio

Mezcla de Azufre con 15% en peso de arena cernida por la malla N°100					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	25.52	254.5	4933	193.30	
2	25.90	264.6	5159	199.19	
3	25.46	260.5	5318	208.88	200.46
Mezcla de Azufre con 20% en peso de arena cernida por la malla N°100					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	25.91	230.0	4095	158.05	
2	26.43	235.0	4356	164.81	
3	26.51	236.5	4158	156.84	159.90
Mezcla de Azufre con 25% en peso de arena cernida por la malla N°100					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	26.66	280.0	7814	293.00	
2	26.77	281.9	7981	298.13	
3	26.51	276.8	7799	294.19	295.11
Mezcla de Azufre con 50% en peso de arena cernida por la malla N°100					
Serie	Area (cm <sup>2</sup> )	Peso (gr)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	27.05	287.0	8415	311.10	
2	26.51	283.0	8827	332.97	
3	26.56	282.0	8027	302.22	315.45

Material para cabeceo azufre – arena cernida<sup>o</sup>

El azufre al mezclarse con los diferentes materiales tuvo el siguiente comportamiento:

En la mezcla con el tabique rojo molido al tratar de incrementar al 50% de este material en relación con el peso del azufre se presentó el problema que no se podía llevar al estado líquido. En todas las demás proporciones no se presentó ese problema, sin embargo, en todas las probetas de ensaye se notó una concentración del azufre hacia el centro de las mismas.

<sup>o</sup> Elaboración propia en base a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio

Cuando se realizó la mezcla con la microsilica se presentaban cristalizaciones en la superficie, al momento de endurecer los cubos, se producen pequeños huecos al centro del cubo.

Con la arena como lo muestran los resultados fue la que presentaron mejores resultados aunque se presentaron ligeros problemas de líquidos con la mezcla 50-50, sin embargo, se pudo realizar el colado en el molde sin problema.

#### 7.4. Experiencias actuales de aplicación en la Ciudad de México.

En los países del llamado primer mundo existen distintos ejemplos que son un buen exponente de las posibilidades futuras que estos concretos ofrecen a los países como el nuestro y a todos aquellos no se han iniciado o profundizado en su tecnología, en los que, posiblemente, al temor ancestral a lo desconocido se suma en la actualidad la incertidumbre de la viabilidad económica del desafío.

En esos países existe una variabilidad increíble en la utilización de los llamados concretos de alta resistencia, además, de los indicados en el primer capítulo de esta tesis hay aplicaciones en cimentaciones, plataformas marinas, puentes etc.

En nuestro país se ha restringido el empleo de concreto de resistencia intermedia a elementos presforzados, cimentaciones especiales y anclajes de diversa naturaleza. En especial, si consideramos que al efectuar una encuesta en cuatro de las empresas constructoras más grandes del país, las resistencias a la compresión más altas empleadas en diversas obras fluctúan alrededor de este valor y no se obtuvieron reportes de resistencias mayores a  $450 \text{ kg/cm}^2$  (44.1 Mpa). Como se indica anteriormente no se ha incursionado en concretos como los mencionados en este trabajo.

Para los propósitos de esta tesis y tomando en cuenta las resistencias usadas en la industria de la construcción en México, definiremos a los concretos de alta resistencia a los que sean mayores a  $400 \text{ kg/cm}^2$  (39.2 Mpa).

En la tabla 7.4.1. se presentan los proyectos construidos en México empleando concretos con resistencias al esfuerzo de compresión por encima de lo común:

Empresa	Proyecto	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
TRIBASA	Puente Zacatal, Campeche	400
TRIBASA	Puente Carr. Lechería-La Venta	350
IC, S.A.	La Joya, Acapulco	400
GUTSA	World Trade Center, México, D.F.	400
GUTSA	Corporativo Lomas, México, D.F.	350
ICA	Puente Mezcala, Guerrero	400
ICA	Línea 8 del Metro, México, D.F.	400
ICA	Puente Coatzacoalcos, Veracruz	400

Tabla 7.4.1.- Obras<sup>λ</sup> con resistencias igual o mayores de 400kg/cm<sup>2</sup>

Se percibe que en pocos países como Japón, Canadá, Noruega, Francia y Estados Unidos de Norteamérica se han implementado programas nacionales de Concreto de alta resistencia. Sin embargo, en México no existe un programa sobre este tipo de estudios que coordine los esfuerzos que en forma aislada han realizado, algunas instituciones conjuntamente con sus investigadores.

<sup>λ</sup> Elaboración propia con información proporcionada por las constructoras señaladas.



**CONCLUSIONES**  
**Y**  
**RECOMENDACIONES**

## **Conclusiones y recomendaciones.**

PRIMERA. Para lograr la obtención de concretos de alta resistencia es primordial efectuar un estudio de los materiales, sus características y propiedades, para ello se requiere revisar su disponibilidad en el mercado para saber la factibilidad de su adquisición.

SEGUNDA. Es indispensable la revisión de la información disponible del equipo y de los aditivos que se emplearan y con ello estar en posibilidades de establecer un programa de trabajo.

TERCERA. En cuanto al estudio de los materiales, es necesario efectuar un proceso de selección de las canteras disponibles de los agregados, considerando los métodos de trituración de los mismos. Y considerar el empleo de agregado fino con módulo de finura cercano a 3.0, para mejorar la trabajabilidad del concreto.

CUARTA. Ser cuidadoso en la elección final tanto de los aditivos químicos como de los minerales teniendo en cuenta sobretodo la compatibilidad de los mismos.

QUINTA. Se puede señalar que es de suma importancia el orden en que se coloque cada uno de los elementos con los que se elaborara el concreto en el proceso de mezclado, porque si el orden de colocación de los materiales es distinto se obtendrán concretos con diferentes resistencias y consecuentemente con distintas características. El consumo de agua es diferente en los distintos métodos de colocación.

SEXTA. Al cambiar las proporciones de los agregados grueso y fino, aumentando el primero y reduciendo el segundo, se ve en los resultados que es benéfico esta variación. Pero fue necesario aplicar dos diferentes tipos de

aditivos químicos para poder tener cierto grado de trabajabilidad aceptable, sin embargo, es necesario verificar su compatibilidad antes de su empleo.

SEPTIMA. Teniendo atención con cada uno de los puntos anteriores se puede garantizar que es posible establecer un procedimiento para elaborar concretos de alta resistencia con equipo que normalmente se usa en las obras de ingeniería.

OCTAVA. Hay que procurar buscar una optimización de la dosificación de los materiales y un análisis de su influencia en relación con su trabajabilidad, desarrollo de resistencias y la durabilidad del concreto fabricado. Así mismo de su comportamiento reológico y de sus propiedades, prestando especial cuidado a la fisuración debida a fenómenos de retracción por secado.

NOVENA. Es importante tratar de determinar un método que pueda indicar u orientar cual será el consumo real de agua, porque como se observo indistintamente de la mezcla realizada hizo falta agua en cada una de ellas, consecuentemente la relación agua/cemento cambio en la mayoría de los caso.

DECIMA. Hay que profundizar en el estudio del comportamiento del concreto de alta resistencia, durante su período de hidratación, así como lo inherente a su estabilidad de volumen, lo anterior se señala porque en el proceso experimental se aprecio que los cilindros que se encontraban curando, ahogados en agua, al ser ensayados registraban resistencias mayores que los que se encontraban en el cuarto de curado.

ONCEAVA. Hay que tener en cuenta que si bien esta nueva generación de concretos estarán diseñados para cumplir una misión específica en las diferentes áreas de la construcción, y si bien es cierto que tienen propiedades específicas con uniformidad y comportamiento tan especial que no se pueden

obtener normalmente usando componentes comunes en la mezcla, colocación y curado. Entre sus propiedades destacan las siguientes: resistencias mecánicas altas a temprana y larga edad y no tienen gran segregación.

DOCEAVA. como consecuencia de su relativa novedad, algunos de los principios que rigen y condicionan el comportamiento de estos materiales no son conocidos en toda su amplitud. Es por ello que existe la necesidad de profundizar en determinados aspectos relacionados con la composición y características específicas del material y en su comportamiento estructural.

TRECEAVA. Hay que procurar un mejor conocimiento de las propiedades de la zona de transición, es decir, conocer en mayor grado, la pasta de cemento (lechada) con los agregados que conformarán el concreto de alta resistencia.

CATORCEAVA. Algunos de los puntos anteriores no se realizaron por falta de recursos económicos y por el tiempo que se requería para realizar la prueba.

Finalmente se espera que esta tesis sirva como base para que en etapas posteriores se puedan estudiar otras características del concreto como: módulo de elasticidad, resistencia al impacto y a la abrasión, flujo diferido y comportamiento ante agentes corrosivos. Y contribuir a que los proyectistas y constructores consideren a este material como una opción viable en proyectos donde se requieran elementos más esbeltos, grandes claros o mayores áreas disponibles y donde el costo total de la obra sea un factor que deba analizarse en forma detallada.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

### I. Legislación consultada:

ASTM – C – 31, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 6 – 11

ASTM – C – 33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 12 – 21

ASTM – C – 39, "Standard Test Method for Compressive Strangth of Cylindrical Concrete Specimens", *Annal Book of ASTM.*, vol. 04.

ASTM – C – 94, "Especificaciones estándar para el Concreto Premezclado", *trad. IMCYC*. México. 1996. págs. 13

ASTM – C – 109, "Standard Test Method for Compressive Strangth of Hydraulic Cement Mortars" (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens), *Annal Book of ASTM.*, vol. 04.01. págs. 74 – 79.

ASTM – C – 143, "Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 111 – 113

ASTM – C – 172, "Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 136 – 138

ASTM – C – 192, "Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 144 – 153

ASTM – C – 230, "Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydaulic Cement", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 166 – 171

ASTM – C – 231, "Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. págs. 172 – 181

ASTM – C – 305, "Practice for Mechanical Mixing of Hydaulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.01. págs. 252 – 255

ASTM – C – 470, "Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically", *Annal Book of ASTM.*, vol. 04.02. págs. 313 – 318

ASTM – C – 494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", *Annal Book of ASTM.*, vol. 04.02. págs. 325 – 335

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 1), "Calidad para Cementos Portland", *Dirección General de Normas*, México. 1980. págs. 10

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 2), "Calidad para Cemento Portland Puzolana", *Dirección General de Normas*, México. 1986. págs. 8

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 175), "Calidad para Cemento Portland de Escoria de Alto Horno", *Dirección General de Normas*, México. 1969. págs. 8

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 122), "Agua para Concreto", *Dirección General de Normas*, México. 1982. págs. 9

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 61), "Determinación de la Resistencia a Compresión de Cementantes Hidráulicos", *Dirección General de Normas*, México. 1976. págs. 12

Norma Oficial Mexicana (NOM – C – 109), "Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto", *Dirección General de Normas*, México. 1985. págs. 8

FERNANDEZ, Orozco León, *Construcción I, Normas Oficiales Mexicanas*. México. 1992. págs. 159.

## II. Publicaciones periódicas consultadas:

ACI COMMITTEE 363, "High – Strength Concrete", *Concrete International: Design & Construction*. V 9, No. 10 Oct. 1987, págs 63-68

ACI COMMITTEE 363, "Research Needs for High-Strength Concrete ", *ACI Materials Journal*, V. 84, No. 6, Nov.-Dec. 1987, págs. 559-561.

ACI COMMITTEE 363, " State the Art Report on High-Strengt Concrete", (*ACI 363r-92*), *American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice*, Par. 1, 1993. págs. 1 – 29

AITCIN, P.C., "Concretos de muy Alta Resistencia". trad. *Subdirección de Documentación y Proyectoteca*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Artículo del mes, México D.F., mayo. 1991. págs.1- 15

AITCIN, P.C.; "Les fluidifiants, des réducteurs d'eau pas comme les autres". *Rev. Annales de l'Institut Technique du Batiment y des Travaux*, Publics No 473 Mars – Avril 1989. págs. 151 – 155

AITCIN P. C., LAPLATE P., and BEDARD C. "Development and Experimental Use of a 90 Mpa (13,000 psi) Field Concrete", *ACI SP-87-5*. 1987. págs.. 51-70.

BLICK, Ronald L., PETERSEN, Charles F., and WINTER, Michael E., "Proportioning and Controlling High-Strength Concrete", *Proportioning Concrete Mixes, SP-46, American Institute Detroit*, 1974, págs. 141-163.

CARRASQUILLO, Ramón, NILSON Arthur H., and SLATE, Floyd O. " Propiedades del Concreto de Alta Resistencia Sujeto a Cargas de Corta". *Revista IMCYC*, v. 19 núm. 126. octubre. 1981. págs. 23 – 33

"Concreto de Alta Resistencia: Técnicas de Producción", *Revista IMCYC*, vol. 22, núm. 164. diciembre 1984. págs. 13 – 16.

COOK, James E., "Research and Application of High-Strength Concrete, 10,000 psi Concrete." *Concrete International*, october 1989. págs. 67 – 75.

DE LARRARD, F.; "A Method for Proportioning High Strength Concrete Mixtures", *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, vol. 12, núm. 2 Summer 1990, págs. 47 – 52.

DE LARRARD, F. and LE ROY, R. "The influence of mix-composition on the mechanical properties of silica-fume high-performance concrete". *Fourth International ACI-CANMET Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. Istanbul. 1992

FIORATO, Anthony E. "PCA Research on High Strength Concrete", *Concrete International: Design & Construction*, V. II No. 4 Apr. 1989, págs. 44-50

GÓMEZ, Domínguez J., "Concretos de Resistencia Superior". *Construcción y Tecnología, IMCYC*, vol. IV. núm. 43, diciembre 1991. págs. 10 – 18

GODFREY JR. K. A., Concrete Strength Record Jumps 36%, *Civil Engineering*. octubre. 1987, págs. 84-88.

HARRIS, A. J. "Ultra-High Strength Concrete", *Journal, Prestressed Concrete Institute*, vol. 12, núm. 1, febrero 1967, págs. 53-59

"High Performance Concrete Meets Stringent Requirements", *Concrete Construction*, mayo. 1992. págs. 371 – 374.

HOLLISTER, S.C., "Urgent Need for Research in High-Strength Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, vol. 73, núm. 3, marzo 1976, págs. 136-137.

HOWARD, Nathan L., and LEATHAM, David M., "The Production and Delivery of High-Strength Concrete", *Concrete International*, april 1989. págs. 26 – 30



HWEE, Yau S. and RANGAN, B. Vijaya., "Studies on Commercial High-Strength Concretes," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, September-October 1990. págs. 440 – 445

KREIJGER, P.C.; "Plasticizers and Dispersing Admixtures", Admixtures, *Concrete International* 1980. The Construction Press, London 1980 págs. 1 – 16.

MACINNIS, Cameron, and THOMSON, Donald V., "Special Techniques for Producing High Strength Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, vol. 67, núm. 12, diciembre 1970, págs. 996-1002.

MALHOTRA, V.M., "Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete", *Concrete International*, May 1981. págs. 66 – 81

MENDOZA, Carlos Javier, y MENA F., Manuel, "Influencia de los agregados en los concretos estructurales del DF". *Revista IMCYC* No. 192, Vol. XXV, mayo 1987. págs. 9 – 20.

METHA, P.K.; "Concrete Structures, Properties and Materials". *Prentice – Hall Inc.* 1986.

MORENO, Jaime., "The State of the Art of High Strength Concrete in Chicago". *Congreso Internacional, Concreto 94 IMCYC*, Acapulco, México, abril 1994. págs. 37-41

OLEK, Jan, COHEN, M.D., and LOBO, C., "Determination of surface Area of Portland Cement and Silica Fume by Mercury Intrusion Porosimetry", *ACI Materials Journal*, vol. 87 No. 5 september-october 1990. págs. 473 – 478

PARROT, L. J., "The Production and Properties of High. Strength Concrete", *Concrete Society Journal*, noviembre de 1969. págs. 443-448.

PARROTT, L. J., "The Properties of High-Strength Concrete", Technical Report, núm. 417, *Cement and Concrete Association*, London, mayo 1969, 12 pp.

PIGEON, M., GAGNÉ, R., AITCIN, P. C., and LANGLOIS M., "La durabilité au gel des bétons à haute performance". *Can. J. Civ. Eng.* vol. 19. 1992. págs. 975 – 980

POWERS, T.C., "Physical Properties of Cement Paste", *Proceedings, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement (Washington, 1960)*, Monograph núm. 43, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1962, Vol. 11, págs. 577-609.

RANDALL, Vaughn, and FOOT, kenneth, "High-Strength Concrete for Pacific First Center", *Concrete International: Design & Construction*, V.II, No. 4, Apr. 1989, págs. 14 - 16

ROSEMBERG, A.M., and GAIDIS, J.M., "A New Mineral Admixture for High-Strength Concrete". *Concrete International*, abril. 1989. págs. 31 – 36

SAKAI, E., "Técnicas para lograr Altos Esfuerzos de Compresión en el Concreto". *Cement Concrete*. núm. 535. 1991. pág. 23 – 27.

SALDAÑA C., Fernando, "Puente Tampico, La Importancia de los Concretos de la Obra" *Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC)*, Vol. I. No.6, Noviembre de 1988. págs. 25 – 28

SAUCIER, Kenneth L. "Concreto de Alta Resistencia", *Revista IMCYC*, Vol. 19 No. 121. mayo. 1981 págs. 35-41

SCRIVENER, K. L., BENTUR, A., and PRATT P. L., "Quantitative Characterization of the Zone in High Strength Concretes", *Advances in Cement Research*, vol. 1, núm. 4. October. 1988. págs. 230 – 237.

SMITH, Gregory J., and RAD, Franz N., "Economic Advantages of High Strength. Concretes in Columns", *Concrete International*, April 1989. p'gs. 37 – 43

WALRAVEN J. C., "High Strength Concrete Production", *Concrete Precasting Plant and Technology*. ISSUE 2/1992. págs. 68 – 72

### III. Obras consultadas:

Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto, Sección 1*. Editorial LIMUSA, México 1994. págs. 258.

GONZÁLEZ ISABEL, Germán, *Hormigón de alta resistencia*, Ed. Grafman S.A., Gallarta, Vizcaya, s.f., págs. 316.

KOSMATKA, Steven H., y PANARESE, William C., *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, trad. Ing. Manuel Santiago Bringas, IMCYC, México, 1992. págs. 230

RIXOM, M.R.; *Chemical Admixtures for Concrete.*, E & F. N. Spon Ltd, Halstead Press, London, 1978. págs. 234.

SHAH and AHMAD.; "High Performance Concrete: Propiedades and Applications" Mc Graw Hill 1994. págs. 403

Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. (ACI 211.1 – 91), trad. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México. 1999. págs. 56.

# **APÉNDICE 1**

## **EJEMPLO DE CALCULO DE MEZCLA**

## "MEZCLA DE PRUEBA"

Con la dosificación propuesta en la tabla A1, se realizaron tres mezclas, con el objetivo de verificar su comportamiento a la compresión, y con ello analizar la posibilidad de seguir trabajando con la misma o tomar otra alternativa.

En la primera mezcla se consideraron las siguientes condiciones:

- Agregar solo un aditivo reductor de agua.
- Como aditivo mineral finamente dividido la microsíllica.
- Tener especial cuidado en el proceso de elaboración del concreto.

Teniendo estas condiciones en cuenta, el proceso que se siguió para el mezclado de la elaboración de este concreto fue el siguiente:

- Colocación de aproximadamente el 10% de agua en la revolvedora.
- Colocación del agregado grueso.
- Colocación del agregado fino
- Se agrego el 50% del agua restante.
- Se añadió la microsíllica.
- Se agrego el aditivo reductor de agua.
- Se puso el cemento.
- Se coloco el agua restante.

Es importante indicar que en el proceso de mezclado de ésta en el inicio los materiales se adherían a las paredes del trompo, por lo que fue necesario despegarlos, sin embargo, al alcanzar una mejor revoltura de los mismos desapareció este efecto alcanzando finalmente un buen revenimiento en el concreto (19 cm). Los resultados de todos los especímenes que fueron sometidos a compresión se encuentran en las tablas siguientes.

En la segunda mezcla, en lugar de utilizarse un solo aditivo reductor de agua (mezcla 1), se emplearon dos ó sea el reductor de agua y un plastificante ambos por partes iguales sumando los dos la cantidad adicionada en la primera mezcla. El beneficio obtenido es el incremento del revenimiento en un centímetro (20 cm), y un incremento de la resistencia en relación con la primera.

La tercera mezcla se elaboró con las mismas cantidades de los materiales empleados en la segunda mezcla, el cambio efectuado consistió en añadir la microsilica en el lugar del cemento y viceversa. Se pudo observar la afección, por el cambio de orden de los materiales, en el revenimiento del concreto, aunque al manipular el mismo fue demasiado fácil e incluso fue necesario descimbrar hasta las cuarenta y ocho horas, mostrando una consistencia plástica lo que indica que el fraguado fue más lento que los casos anteriores, sin embargo, la resistencia final fue superior.

MATERIAL	Kg/m <sup>3</sup>
Cemento	513
Grava	1080
Arena	685
Agua	120
Superplastificante	19 lt/m <sup>3</sup>
Microsilica	43

Tiempo de ensaye	Resistencia a la compresión en MPa
7 días	93.2
28 días	119.4
56 días	----
90 días	145.0

Tabla A1. – Cantidades de los materiales usados en una investigación y los resultados a la compresión de la mezcla empleada.

### "DOSIFICACIÓN PROPUESTA"

Es importante indicar que el objetivo de la "dosificación propuesta" (tabla A2) tiene principalmente dos propósitos, primero el de comprobar el comportamiento de los diferentes cementos utilizados y segundo el de tratar de ver cual es el comportamiento físico de la misma con la inclusión de la microsíllica. Una de las consideraciones contempladas es el de mantener un mayor volumen del agregado grueso, teniendo en cuenta que la microsíllica se puede considerar como una parte del agregado fino.

MATERIAL	CANTIDAD
CEMENTO	593 kg/m <sup>3</sup>
GRAVA	998 kg/m <sup>3</sup>
ARENA	537 kg/m <sup>3</sup>
AGUA	158 kg/m <sup>3</sup>
MICROSÍLICA	107 kg/m <sup>3</sup>
SUPERFLUIDIFICANTE	8.9 lt/m <sup>3</sup>

Tabla A2.- Cantidades de materiales propuestos para comprobar el comportamiento de los diferentes cementos empleados.

Como la elaboración de estas tres mezclas (tres cementos) no son parte esencial de la investigación se consideró únicamente para cada una ellas la elaboración de 18 especímenes para su ensayo. Se consideraron los ensayos correspondientes a 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días. En las siguientes tres tablas, una por cada tipo de cemento, se puede ver el correspondiente comportamiento de las mismas.

Es importante indicar que la trabajabilidad de la mezcla presentó dificultades por lo cual se necesito añadir una mayor cantidad de agua, aproximadamente el 45% de la propuesta, en todos los casos. Este suceso indica que la microsíllica utiliza un buen porcentaje de ella, teniendo en consideración que también se añadió el aditivo superfluidificante.

CEMENTO "A"									
PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO cm <sup>2</sup>	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1.00	184.58	33600.00	182.04						
2.00	176.48	75200.00				426.11			
3.00	174.84	89900.00							514.20
4.00	176.01	88200.00							501.11
5.00	178.37	63000.00			353.20				
6.00	176.48	35200.00	199.46						
7.00	178.84	56800.00		317.60					
8.00	179.08	56000.00		312.71					
9.00	179.08	65600.00			366.32				
10.00	177.19	83900.00						473.51	
11.00	176.01	72000.00				409.07			
12.00	174.84	84200.00						481.60	
13.00	176.95	83800.00						473.58	
14.00	176.01	90000.00							511.34
15.00	176.95	89700.00							506.92
16.00	180.51	84000.00						465.36	
17.00	176.01	78100.00					443.73		
18.00	175.54	70250.00					400.20		
	PROMEDIOS		190.75	315.15	359.76	417.59	421.96	473.51	508.39

CEMENTO "B"									
PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO cm <sup>2</sup>	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1.00	175.30	49600.00			282.94				
2.00	182.89	44300.00		242.22					
3.00	178.37	33900.00		190.06					
4.00	177.66	76500.00						430.60	
5.00	186.02	55300.00			297.27				
6.00	180.03	65500.00					363.83		
7.00	178.37	72200.00						404.78	
8.00	184.82	69000.00				373.34			
9.00	177.42	25600.00	144.29						
10.00	175.54	23500.00	133.87						
11.00	175.54	69400.00					395.35		
12.00	180.03	65300.00				362.72			
13.00	178.60	75000.00						419.92	
14.00	179.08	77800.00							434.45
15.00	176.72	78000.00							441.39
16.00	176.24	73400.00						416.47	
17.00	178.60	78100.00							437.28
18.00	181.46	77500.00							427.09
	PROMEDIOS		139.08	216.14	290.11	368.03	379.59	417.94	435.05



CEMENTO "C"									
PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO cm <sup>2</sup>	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1.00	179.55	30100.00	167.64						
2.00	179.08	28650.00	159.99						
3.00	178.84	48900.00		273.43					
4.00	176.72	54300.00			307.27				
5.00	183.61	61500.00				334.94			
6.00	181.94	67700.00					372.11		
7.00	177.90	73600.00						413.73	
8.00	176.48	73500.00							416.48
9.00	178.37	39200.00		219.77					
10.00	179.79	52600.00			292.56				
11.00	176.01	62800.00				356.80			
12.00	175.07	72800.00					415.83		
13.00	176.24	77600.00						440.30	
14.00	176.72	76600.00							433.47
15.00	180.74	76900.00						425.47	
16.00	180.03	74900.00							416.04
17.00	179.55	77000.00						428.84	
18.00	178.60	73600.00							412.08
	PROMEDIOS		163.81	246.60	299.92	345.87	393.97	427.08	419.52

## METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL PROPORCIONAMIENTO DE LA "DOSIFICACIÓN BASE"

### DATOS DE PRUEBAS

En lo posible la dosificación del concreto se debe basar en los datos que se obtienen de las pruebas o en la experiencia adquirida a través del tiempo. Cuando los antecedentes son limitados o no estén disponibles se pueden aplicar los valores estimados que se presentan en la práctica.

### INFORMACIÓN REQUERIDA DE LOS MATERIALES.

1. – Análisis granulométrico del agregado grueso y del fino.
2. – Pesos específicos de los materiales.
3. – Pesos volumétricos sueltos y compactos de los agregados.
4. – Absorción del agregado grueso y del fino.
5. – Tamaño nominal del agregado grueso.
6. – Módulo de finura del agregado fino.
7. – Humedad de los agregados en el momento de efectuar las mezclas.

El procedimiento para la dosificación de la mezcla que se expone aquí es el aplicable al concreto de peso normal, solo que para efectos de esta investigación se adecuo el método de acuerdo a los requerimientos de los objetivos planteados.

La dosificación de la mezcla del concreto requerido implica una secuencia de pasos lógicos y directos. Las especificaciones del mismo pueden exigir todas o algunas de los siguientes requisitos:

- ◆ Tamaño máximo del agregado grueso.
- ◆ Resistencia del concreto requerido.
- ◆ Revenimiento.

- ◆ Contenido mínimo de cemento.
- ◆ Relación de los agregados pétreos.
- ◆ Contenido de aire.
- ◆ Otros requisitos relacionados con aditivos, tipos especiales de cemento u otros materiales cementantes o agregados diferentes a los normales.

Independientemente que las características del concreto estén prescritas en las especificaciones o de que se deje la dosificación a criterio del especialista que la va a realizar, la determinación de las cantidades de los materiales del diseño de la mezcla se lleva a cabo satisfactoriamente de acuerdo a la siguiente secuencia:

\* Primer paso; elección del revenimiento.

Para el caso del proyecto que se está realizando, se selecciono un revenimiento de 10cm como dato de entrada en el diseño de la mezcla.

\* Segundo paso; tamaño máximo del agregado grueso.

El tamaño del agregado con el que se dispone es de 25 mm, de origen sedimentario (caliza), sin menoscabo que se señala que se puede utilizar el disponible en la localidad, cuya granulometría debe de estar entre la malla número 4 a la de 40 mm.

Cabe mencionar que cuando se trata de concretos de alta resistencia se pueden obtener mejores resultados con agregados de tamaño máximo de 19 mm o menores, sin embargo, se han utilizado de 25 mm o mayores con buenos resultados.

En este paso también se puede determinar el probable contenido de aire de la mezcla de acuerdo al tamaño nominal que se emplee.

\* Tercer paso; cálculo del agua de mezclado.

La cantidad de agua que se requiere en el mezclado para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo del agregado grueso, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, la temperatura del concreto y el uso de aditivos químicos.

La tabla "A" nos indica los valores medios de agua en  $\text{kg/m}^3$  de concreto para obtener el revenimiento deseado, así mismo la cantidad aproximada de aire, en función del tamaño nominal del agregado grueso indicado.

Cabe mencionar que, por ser más fácil de utilizar, se empleo la tabla "A" misma que fue copiada de las notas del Ing. León Fernández O. (q.e.p.d.) y que son muy semejantes a las del A.C.I.

Revenimiento (cm)	Tamaño Nominal Del Agregado Grueso (mm)						
	10	13	20	25	40	50	76
3	200	195	184	175	161	151	139
5	215	205	192	182	169	159	147
10	232	219	204	194	178	170	159
15	239	226	211	200	186	178	168
18	244	230	216	204	190	181	171
Aprox. de aire atrapado en %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

Tabla "A".- Requisitos promedio de agua promedio de mezclado.

Es importante tener en cuenta que según sea la textura y la forma del agregado pueden implicar que los requerimientos de agua de mezclado estén ligeramente por encima o por debajo de los valores indicados en la tabla. Además es preciso

recordar que cuando el volumen de aditivo líquido es importante, éste se debe considerar como parte del agua de mezclado.

\* Cuarto paso; Selección de la relación agua/cemento.

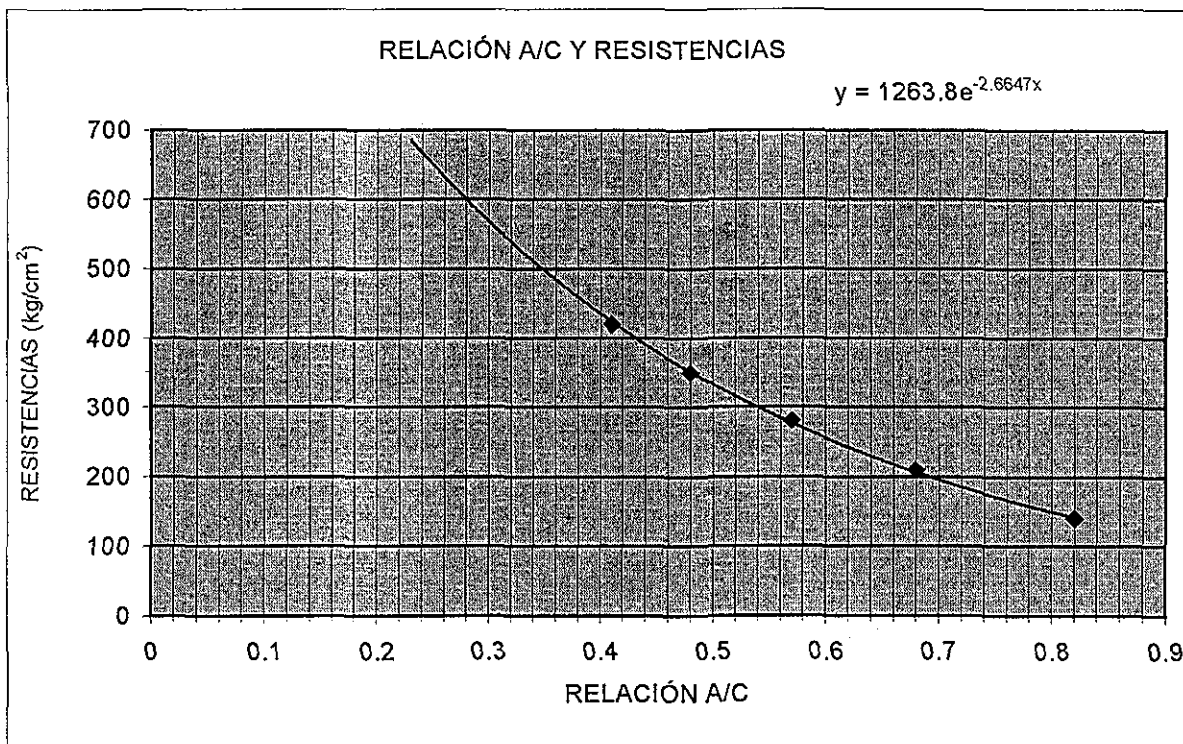
“La relación agua/cemento o agua/materiales cementantes requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, si no también por otros factores como durabilidad. Puesto que diferentes agregados, cementos y materiales cementantes producen generalmente resistencias diferentes empleando la misma relación agua/cemento o agua/materiales cementantes, es muy deseable establecer una relación entre las resistencias y la relación agua cemento para los materiales que de hecho se van a emplear. En ausencia de estos datos, se puede tomar de la tabla “B” los cuales son valores aproximados y relativamente conservadores para concretos que contengan un cemento portland tipo 1 y materiales comunes.” \*

Correspondencia entre la relación agua/cemento o agua/materiales cementantes y la resistencia a la compresión del concreto.	
Relación agua/cemento en peso Concreto sin aire incluido	Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm <sup>2</sup>
0.41	420
0.48	350
0.57	280
0.68	210
0.82	140

Tabla “B”.- Relaciones agua/cemento en relación a la resistencia a la compresión del concreto.

Las resistencias indicadas en la tabla anterior son en base a pruebas a las 28 días de muestras curadas en condiciones normales de laboratorio. En el caso de la investigación que se esta realizando se optó por utilizar cemento tipo II (modificado) el que tiene como ventaja reducir el calor de hidratación que es motivado por el alto contenido de cemento.

La resistencia que se pretende lograr en la "mezcla base" debe de ser superior a 420 kg/cm<sup>2</sup> que es la máxima en la tabla "B", como valor hipotético se toma una resistencia aproximada a los 600 kg/cm<sup>2</sup>. Con los resultados reales que se obtengan, se comenzarán a efectuar algunas variaciones en los materiales que intervienen en la fabricación del concreto, tales como; la adición de la microsilica y la de los aditivos superfluidificantes, y finalmente cambiar las cantidades de los mismos con el propósito de obtener resistencias mayores a la inicial. Para lograr este propósito fue necesario efectuar una extrapolación con los valores de la tabla "B", obteniendo como resultado la gráfica "A" la cual se muestra a continuación.



Gráfica "A". – Extrapolación de las relaciones agua/cemento con sus resistencias correspondientes.

\* Quinto paso; Cálculo del contenido de cemento.

La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el tercer y cuarto paso anteriores, por lo tanto, el

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

cemento requerido es igual al contenido estimado del agua de mezclado (tercer paso), dividido entre la relación agua/cemento obtenida (cuarto paso).

\* Sexto paso. Estimación del contenido del agregado grueso.

Los agregados con tamaño máximo nominal y granulometría esencialmente iguales producen concretos de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Los volúmenes de agregado grueso son calculados mediante el uso de la tabla "C", para lo cual, es empleado el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el modulo de finura del agregado fino. Cabe mencionar que los volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado al colado de elementos comunes con acero de refuerzo. Sin embargo, se puede reducir o aumentar la cantidad de volumen del mismo, aproximadamente en 10%, para lograr concretos con más o menos trabajabilidad respectivamente.

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto					
Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso varillado en seco, por metro cúbico de concreto para distintos módulos de finura de la arena.			
milímetros	pulgadas	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	$\frac{3}{8}$	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	$\frac{1}{2}$	0.59	0.57	0.55	0.53
19	$\frac{3}{4}$	0.66	0.64	0.62	0.60
25	$1\frac{1}{2}$	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	1	0.75	0.73	0.71	0.69
50	2	0.78	0.76	0.74	0.72
75	3	0.82	0.80	0.78	0.76
150	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla "C". – Volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto.

En el caso de la investigación que se esta efectuando se considero conveniente que el concreto tuviera una buena trabajabilidad, en otras palabras disminuir el volumen del agregado grueso lo que ocasionaría un aumento del agregado fino.

\* Séptimo paso; Estimación del contenido del agregado fino.

Se puede efectuar la estimación del valor de la cantidad del agregado fino por dos métodos, el primero consiste en determinarla en base al peso estimado del metro cúbico del concreto fresco, para lo cual se requiere del tamaño máximo nominal del agregado grueso y de las tablas del A.C.I. El segundo que, es el que se utilizara en la "mezcla base", consiste en que al termino del paso anterior se tienen las cantidades de los materiales para un metro cúbico de concreto, excepto la del agregado fino cuya cantidad se determina mediante el procedimiento de sumar todos los volúmenes conocidos de los demás componentes, en otras palabras, del agua, aire, cemento y agregado grueso, y restarlos al metro cúbico obteniendo así con esta operación el volumen requerido del agregado fino.

\* Octavo paso; Ajustes del agua por la absorción de los agregados.

Las cantidades del agregado que efectivamente se deben pesar, para formar parte del concreto, tienen que contemplar la cantidad de agua que tienen en su interior en el momento de que se va a realizar la mezcla, generalmente contienen cierta cantidad de agua (húmedos), y como se considero inicialmente el peso seco se debe efectuar los cálculos correspondientes para tener de manera más precisa la cantidad de agua que se va a añadir a la mezcla. Recordando que los agregados se consideran en estado saturado superficialmente secos, con el objeto que estos no agreguen ni quiten agua, para mantener la relación agua/cemento.



## CÁLCULO DE LA "DOSIFICACIÓN BASE"

### DATOS DE LOS MATERIALES.

#### Agregado grueso.

$P_{esss}$	$P_{es}$	Abs	P.V.S.	P.V.C:	T.N.
kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	mm
2.815	2.79	0.9	1369.07	1522.93	25

#### Agregado fino.

$P_{esss}$	$P_{es}$	Abs	P.V.S.	P.V.C.	M.F.
kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
2.28	2.06	10.6	1397.6	1572.88	3.3

Cemento.

$$P_e = 3.15 \text{ kg/dm}^3$$

Con los datos anteriores se realizan todo los ocho pasos indicados.

- Primer paso.

Revenimiento considerado = 10 cm

- Segundo paso.

Tamaño máximo nominal = 25 mm (caliza).

- Tercer paso.

De la tabla "A" y teniendo como valores fijos los valores del 1° y el 2° paso se obtiene la cantidad de agua que se requiere para la mezcla. Así mismo, en la tabla se obtiene la cantidad aproximada de aire atrapado en la mezcla.

$$\text{Cantidad de agua} = 194 \text{ kg. ó } 194 \text{ dm}^3$$

$$\text{Cantidad de aire} = 15 \text{ dm}^3$$

- Cuarto paso.

Si se considera en principio una resistencia aproximada de  $600 \text{ kg/cm}^2$  se puede determinar, mediante la tabla "B" ó la formula que se encuentra en la misma, la relación agua cemento correspondiente y así determinar la cantidad de cemento requerido.

De forma práctica si se toman los  $600 \text{ kg/cm}^2$  se puede determinar en la gráfica un valor de la relación agua/cemento de 0.28, revisando la correspondencia con la formula se tendría para este valor:

$$Y = 1263.8e^{-2.6647x}$$

$$Y = 1263.8e^{-2.6647(0.28)} = 599.3 \text{ kg/cm}^2$$

Se considero utilizar en la relación agua/cemento un valor aproximado de 0.275 que es ligeramente inferior a 0.28, para tratar de garantizar una mejor resistencia por lo cual la resistencia teórica de la mezcla de diseño será:

$$Y = 1263.8e^{-2.6647(0.275)} = 607.33 \text{ kg/cm}^2$$

- Quinto paso.

Siguiendo con los cálculos correspondientes, teniendo en cuenta los pasos 3° y 4°, se tiene que:

$$a/c = 0.275 = 194 \text{ kg/c por lo tanto;}$$

$$c = 194 \text{ kg}/0.275 = 705.45 \text{ kg.}$$

Si se considera un peso específico del cemento de  $3.15 \text{ kg/dm}^3$  se tiene por lo tanto;

$$\text{Volumen} = \text{Peso}/\text{Pe} = 705.45 \text{ kg}/ 3.15 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Volumen} = 223.95 \text{ dm}^3$$

- Sexto paso.

La determinación de la cantidad del agregado grueso se realiza utilizando la tabla "C", entrando a ella con el módulo de finura de la arena (M:F) y el tamaño máximo

nominal del agregado grueso (T.N.). En el caso particular del estudio que se esta realizando el M.F es de 3.3 y el T.N. corresponde a 25 mm.

Con los valores anteriores fue necesario efectuar una extrapolación para obtener el valor correspondiente a la cantidad del agregado grueso. Por lo tanto, el valor correspondiente es el de 0.62 del m<sup>3</sup>.

De acuerdo al procedimiento establecido tenemos;

$$\begin{aligned} \text{Volumen del agregado grueso} &= 0.62 \times P.V.S.; \\ &= 0.62 \times 1369.07 = 848.82 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Si se considera el 10\% menos se tiene} &= 848.82 \text{ kg/m}^3 - 0.1 (848.82 \text{ kg/m}^3) \therefore \\ &= 763.94 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{le corresponde un volumen } V = 273.82 \text{ dm}^3$$

• Séptimo paso.

Se suman las cantidades de los materiales calculadas hasta el momento. Cabe mencionar que se empleo el método de volumen absoluto, porque el método de peso limita principalmente el consumo de cemento, menciona revenimiento medio y pesos específicos de los agregados de 2.7 kg/dm<sup>3</sup>.

MATERIAL	CANTIDAD	
	kg.	dm <sup>3</sup>
AGUA	194.00	194.00
AIRE	--	15.00
CEMENTO	705.45	223.95
AGREGADO GRUESO	763.94*	273.82
TOTAL	1663.39	706.77

\* Material en estado seco

El volumen del agregado fino se obtiene restando el total anterior de 1000 dm<sup>3</sup>.

$$\therefore V = 293.23 \text{ dm}^3$$

- Octavo paso.

Las cantidades de los materiales que se emplearan, teniendo en cuenta la cantidad de agua que pueden absorber, para efectuar la "dosificación base" de un metro cúbico de concreto son:

MATERIAL	CANTIDAD	
	kg.	dm <sup>3</sup>
AGUA	194.00	194.00
AIRE	--	15.00
CEMENTO	705.45	223.95
AGREGADO GRUESO	770.81 <sup>Δ</sup>	273.82
AGREGADO FINO	668.55 <sup>Δ</sup>	293.23
TOTAL	2338.81	1000.00

<sup>Δ</sup> Materiales en estado saturado superficialmente seco.

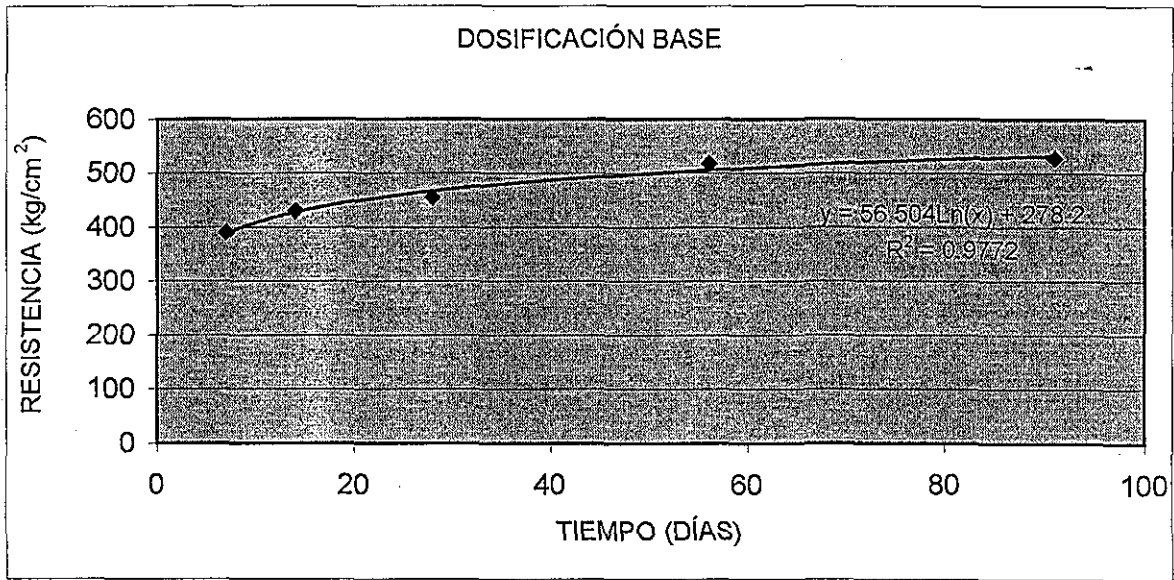
Finalmente al en el momento de efectuar la mezcla se tienen que realizar las correcciones por la cantidad de agua contenida (humedad) en los materiales, es decir, se calcula la cantidad de agua que tienen los materiales con el objeto de no añadir o quitar parte del agua que será utilizada efectivamente por el cemento.

Los resultados de los ensayos a compresión axial de la "dosificación base" se encuentran en las hojas siguientes y posteriormente todas las probetas que se ensayaron durante la investigación.

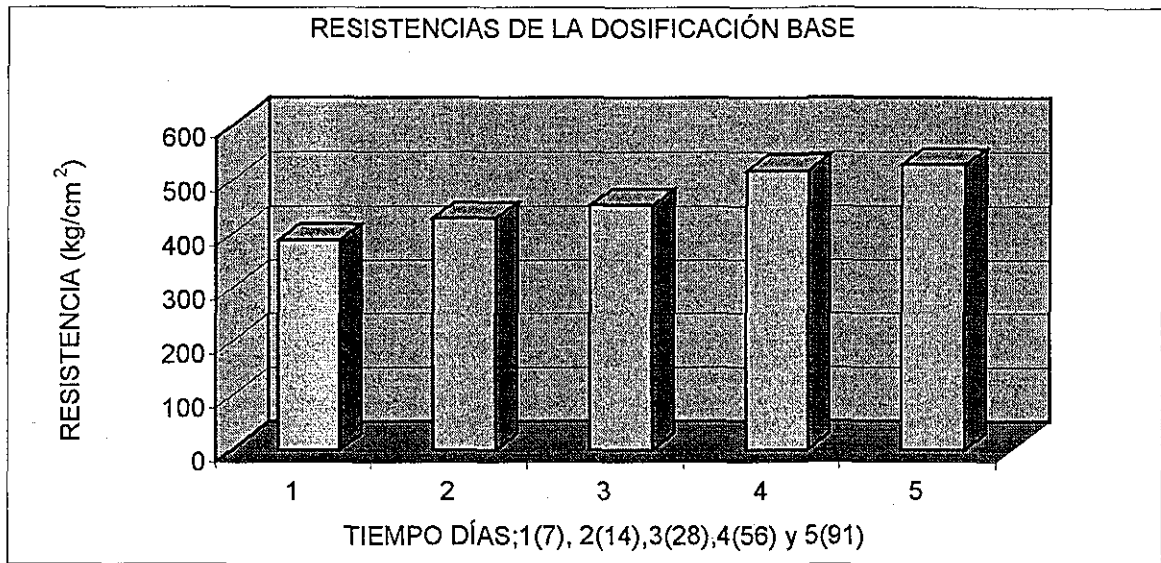
PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO cm <sup>2</sup>	CARGA (kg)	1 DÍA	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1.00	177.19	71200.00		401.84				
2.00	177.19	82500.00				465.61		
3.00	175.54	76200.00			434.09			
4.00	175.54	91800.00					522.96	
5.00	177.19	94700.00						534.46
6.00	177.19	80100.00				452.07		
7.00	175.54	90200.00					513.85	
8.00	179.55	73000.00		406.56				
9.00	176.72	77500.00			438.56			
10.00	175.54	93200.00						530.94
11.00	176.95	94000.00						531.22
12.00	175.54	79900.00				455.17		
13.00	175.54	93000.00					529.80	
14.00	176.72	93500.00						529.10
15.00	176.95	68650.00		387.96				
16.00	176.95	81200.00				458.88		
17.00	174.37	90600.00					519.59	
18.00	176.48	76600.00			434.04			
PROMEDIOS PARCIAL 1				398.79	435.57	457.93	521.55	531.43

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO cm2	CARGA (kg)	1 DÍA	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS	
19.00	176.72	75600.00			427.81				
20.00	176.72	90000.00					509.29		
21.00	175.54	92250.00						525.52	
22.00	181.46	81200.00				447.48			
23.00	177.19	66500.00		375.31					
24.00	177.66	75800.00			426.66				
25.00	179.08	92000.00					513.74		
26.00	178.13	94000.00						527.70	
27.00	180.03	81400.00				452.15			
28.00	177.19	92550.00					522.33		
29.00	179.55	70100.00		390.41					
30.00	177.66	93200.00						524.60	
31.00	176.95	93200.00						526.70	
32.00	179.08	75000.00			418.81				
33.00	175.54	80100.00				456.31			
34.00	180.51	92400.00					511.90		
35.00	181.46	81600.00				449.69			
36.00	175.54	65600.00		373.71					
PROMEDIOS PARCIAL 2					379.81	424.43	451.41	514.32	526.13
PROMEDIO TOTAL 1-2					389.30	430.00	454.67	517.93	528.78

En las gráficas GA1 se muestra la curva de tendencia del incremento de la resistencia a través del tiempo, la formula correspondiente y la correlación de los datos y en la GA2 se puede ver simplemente como se incrementa la resistencia con respecto al tiempo.



Gráfica GA1.- Gráfica de tendencia de la curva de resistencia a través del tiempo



Gráfica GA2.- Incremento de la resistencia del concreto a través del tiempo

# **APENDICE 2**

## **RESULTADOS DE PROBETAS ENSAYADAS**



PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	177.90	49200	276.57						
2	180.03	49200	273.29						
3	175.77	66200		376.62					
4	176.95	76900			434.58				
5	178.13	85000				477.18			
6	176.24	93600					531.08		
7	174.84	98000						560.53	
8	177.19	97400							549.70
9*	176.95	65800		371.85					
10*	180.27	78500			435.47				
11*	182.18	88600				486.34			
12	181.94	96400					529.85		
13*	181.70	103200						567.98	
14*	181.46	100200							552.19
15*	176.24	96800					549.24		
16*	177.19	100100						564.94	
17*	175.77	97900							556.97
18*	176.72	97700							552.87

\*Sumergidos en agua

274.93    374.24    435.02    481.76    536.72    564.48    552.93

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "A"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19*	176.24	97000							550.37
20	179.08	46800	261.34						
21	182.18	65700		360.64					
22	179.55	76800			427.73				
23	176.01	85200				484.07			
24	176.24	92900					527.11		
25	181.46	99800						549.99	
26	179.08	98200							548.36
27	182.42	47000	257.65						
28*	178.60	65200		365.05					
29*	179.32	79300			442.24				
30*	177.66	87600				493.08			
31*	180.51	95600					529.63		
32*	175.77	100500						571.76	
33*	180.51	99100							549.02
34	181.46	92400					509.21		
35*	175.77	100600						572.33	
36	176.95	96800							547.05

\*Sumergidos en agua

259.50 362.85 434.98 488.57 521.98 564.69 548.70

PROMEDIOS

267.21 368.54 435.00 485.17 529.35 564.59 550.82

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "A"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.95	44400	250.92						
2	176.24	58000		329.09					
3	179.08	71100			397.03				
4	176.01	77800				442.02			
5	175.30	87200					497.42		
6*	176.01	99000						562.47	
7	176.72	98600							557.96
8	175.77	47400	269.66						
9*	181.70	62100		341.78					
10*	175.07	70000			399.84				
11*	176.24	79600				451.65			
12	176.01	89000					505.66		
13	179.32	99000						552.10	
14*	177.90	99700							560.44
15	179.55	90700					505.14		
16	177.19	98000						553.09	
17	176.24	98600							559.45
18*	177.42	90500					510.08		

\* Sumergidos en agua.

260.29    335.43    398.44    446.83    504.58    555.89    559.28

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "B"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	174.84	43200	247.09						
20*	176.24	59700		338.73					
21	180.27	73500			407.73				
22	177.66	81200				457.06			
23	178.84	90700					507.15		
24*	176.01	99100						563.04	
25	177.90	99800							561.00
26	176.95	47000	265.61						
27	176.72	56000		316.89					
28*	179.08	73300			409.32				
29*	177.19	82600				466.18			
30	175.77	89900					511.45		
31	177.66	98900						556.69	
32	180.03	100800							559.91
33*	178.13	92200					517.60		
34	176.95	98600						557.22	
35*	179.08	100300							560.09
36*	179.55	100400							559.16

\* Sumergidos en agua.

256.35    327.81    408.52    461.62    512.07    558.98    560.04

PROMEDIOS

258.32    331.62    403.48    454.23    508.32    557.43    559.66

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "B"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	180.03	47600	264.40						
2	181.46	49400	272.24						
3*	174.60	65500		375.14					
4	175.77	76400			434.65				
5*	176.72	90400				511.56			
6	181.46	97400					536.76		
7	179.79	106800						594.02	
8*	178.60	109000							610.29
9	180.98	63900		353.07					
10	176.48	79400			449.91				
11*	182.42	91800				503.25			
12	181.46	99000					545.58		
13*	179.08	112200						626.54	
14	184.34	100000							542.49
15*	176.48	97800					554.17		
16	176.72	107900						610.59	
17*	176.24	108500							615.62
18	179.08	99500							555.62

\* Sumergidos en agua.

268.32    364.11    442.28    507.40    545.50    610.38    581.00

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "C"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	179.08	50100	279.76						
20	175.54	62000		353.20					
21	179.08	76000			424.39				
22	176.48	91000				515.64			
23	179.08	96500					538.87		
24	181.46	106900						589.11	
25*	179.08	107500							600.29
26	181.46	45000	247.99						
27*	176.48	64900		367.75					
28*	179.08	80000			446.73				
29	181.46	90000				495.98			
30*	176.72	99300					561.92		
31*	176.24	111100						630.38	
32	181.46	99900							550.54
33	181.46	95000					523.53		
34	176.48	106000						600.64	
35	176.48	99300							562.67
36*	179.08	110900						619.28	

\* Sumergidos en agua.

263.88      360.47      435.56      505.81      541.44      609.85      571.17

PROMEDIOS

266.10      362.29      438.92      506.61      543.47      610.12      576.09

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "C"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	175.77	69600		395.96					
2	174.13	84800				486.98			
3	176.72	48300	273.32						
4*	182.65	79900			437.44				
5	175.77	87800					499.51		
6	174.84	100000						571.97	
7*	176.48	115000							651.63
8*	173.20	88700					512.13		
9	175.77	69200		393.69					
10*	173.90	75200			432.44				
11	175.77	47400	269.66						
12*	176.48	85100				482.21			
13*	183.85	100800						548.26	
14	178.84	116000							648.62
15*	176.72	90300					510.99		
16*	176.01	74600		423.84					
17	179.08	115600							645.52
18	176.01	103500						588.04	

\* Sumergidos en agua.

271.49    404.50    434.94    484.60    507.54    569.42    648.59

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "D"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	48500	274.45						
20	174.37	70100		402.03					
21	181.46	79400			437.56				
22	176.24	85000				482.29			
23*	177.90	91600					514.91		
24	173.90	99400						571.60	
25	176.48	119200							675.43
26	176.72	89700					507.60		
27	183.85	104200						566.75	
28*	176.24	119800							679.74
29*	173.90	99900						574.47	
30	179.08	120100							670.65
31*	176.24	102300						580.45	
32*	179.08	92100					514.30		
33*	176.72	87200				493.45			
34	176.48	77600			439.71				
35	176.72	71200		402.91					
36	178.60	48400	270.99						

\* Sumergidos en agua.

272.72    402.47    438.64    487.87    512.27    573.32    675.28

PROMEDIOS

272.11    403.48    436.79    486.23    509.91    571.37    661.93

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "D"



PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	174.13	41400	237.75						
2	181.46	68000		374.74					
3*	177.42	81000			456.54				
4	176.48	90000				509.97			
5*	173.90	101200					581.95		
6	181.94	106800						587.02	
7	176.48	106200							601.77
8	176.01	38500	218.74						
9	182.89	63700		348.29					
10	180.03	78200			434.37				
11	176.72	92600				524.01			
12	180.51	102800					569.51		
13*	179.32	107000						596.71	
14*	176.24	107700							611.08
15	176.72	100000					565.88		
16*	176.48	105000						594.97	
17*	176.72	108300							612.85
18	181.46	106200						585.26	

\* Sumergidos en agua.

228.24    361.51    445.46    516.99    572.45    590.99    608.57

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "E"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	40000	226.35						
20	176.48	64800		367.18					
21*	179.08	81200			453.43				
22	179.55	90700				505.14			
23	176.48	100100					567.20		
24*	176.24	105000						595.76	
25	178.60	109100							610.85
26	176.24	38500	218.45						
27	179.08	62200		347.33					
28	179.55	77600			432.18				
29	181.46	94200				519.13			
30*	176.48	101400					574.57		
31*	179.08	106500						594.71	
32*	176.72	108900							616.25
33*	181.46	107000						589.67	
34	176.24	99600					565.13		
35*	176.48	105500						597.80	
36	176.48	107800							610.84

\* Sumergidos en agua.

222.40      357.26      442.81      512.13      568.97      594.49      612.64

PROMEDIOS

225.32      359.39      444.13      514.56      570.71      592.74      610.61

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "E"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.72	42500	240.50						
2	179.08	68200		380.84					
3	175.30	79600			454.07				
4	176.24	90000				510.66			
5	176.48	93400					529.24		
6	176.72	109000						616.81	
7*	177.42	109000							614.35
8	176.72	45000	254.65						
9	181.46	70100		386.31					
10	178.60	79100			442.88				
11*	181.22	97600				538.57			
12	183.85	102000					554.79		
13	179.08	109000						608.67	
14	176.72	108400							613.42
15	179.08	110000						614.25	
16*	176.48	103500					586.47		
17*	176.24	109700						622.43	
18	179.08	108800							607.55

\* Sumergidos en agua.

247.57    383.58    448.47    524.61    556.83    615.54    611.77

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "F"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.48	41600	235.72						
20	179.08	66100		369.11					
21	176.72	79100			447.61				
22	176.24	87500				496.47			
23	177.42	92900					523.61		
24	179.08	108700						606.99	
25*	176.01	107800							612.47
26	176.48	44000	249.32						
27*	179.08	68000		379.72					
28	176.72	79000			447.05				
29*	181.46	96500				531.80			
30	176.48	94000					532.64		
31*	176.24	107600						610.52	
32	177.42	107200							604.21
33	179.08	108800						607.55	
34	180.27	95400					529.22		
35*	181.46	110900						611.16	
36*	179.08	108800							607.55

\* Sumergidos en agua.

242.52      374.42      447.33      514.14      528.49      609.06      608.08

PROMEDIOS

245.05      379.00      447.90      519.37      542.66      612.30      609.93

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "F"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	178.60	31500	176.37						
2	175.77	65900		374.91					
3*	179.08	36600	204.38						
4	176.01	66200			376.12				
5	176.01	87000				494.29			
6	177.19	84400					476.33		
7*	177.90	106400						598.11	
8	179.08	109100							609.23
9	175.30	65800		375.35					
10*	176.72	64000			362.17				
11	174.13	87400				501.92			
12*	182.18	101000					554.41		
13*	176.95	106800						603.56	
14	181.46	110600							609.50
15	176.48	95600					541.71		
16	176.01	104000						590.88	
17*	176.72	108500							613.98
18	181.46	106800						588.56	

\* Sumergidos en agua.

190.37    375.13    369.14    498.10    524.15    595.28    610.91

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "G"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	62 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	31800	179.95						
20	179.08	64300		359.06					
21	176.48	30200	171.12						
22	181.46	64900			357.66				
23	176.24	84500				479.45			
24	176.48	89900					509.41		
25	176.01	101700						577.81	
26	176.72	106100							600.40
27*	179.08	66100		369.11					
28	177.19	64800			365.72				
29*	176.48	89200				505.44			
30*	179.08	95900					535.52		
31*	176.24	103600						587.82	
32	176.01	105900							601.67
33	176.72	90700					513.26		
34	178.60	102400						573.33	
35*	176.48	107400							608.57
36	179.08	103200						576.28	

\* Sumergidos en agua.

175.54      364.09      361.69      492.45      519.39      578.81      603.55

PROMEDIOS

182.96      369.61      365.41      495.27      521.77      587.04      607.23

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "G"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.72	3800	21.50						
2	173.90	65600		377.23					
3*	175.77	77300			439.77				
4	176.48	89400				506.57			
5	178.37	2400	13.46						
6	174.37	95600					548.27		
7*	176.72	106500						602.67	
8*	177.19	111200							627.59
9	177.42	76800			432.86				
10	174.60	84000				481.10			
11	177.19	96600					545.19		
12	176.48	105800						599.50	
13*	174.37	108400							621.68
14*	176.24	110300							625.84
15	176.72	105100						594.74	
16*	178.37	98400					551.67		
17	177.42	106000						597.44	
18	179.08	64700		361.29					

\* Sumergidos en agua.

17.48      369.26      436.32      493.84      548.38      598.59      625.03

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "H"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.48	3000	17.00						
20	173.90	100300						576.77	
21	176.48	96400					546.24		
22	179.08	64800		361.85					
23	180.27	78400			434.91				
24	178.84	85300				476.96			
25*	181.46	100400					553.29		
26	176.01	101200						574.97	
27	177.19	107900							608.96
28	178.60	64900		363.37					
29	176.01	75200			427.25				
30	176.48	89700				508.27			
31*	179.08	98700					551.15		
32*	176.72	104400						590.78	
33	177.19	109100							615.74
34	176.01	2800	15.91						
35*	176.72	103800						587.39	
36*	176.72	111000							628.13

\* Sumergidos en agua.

16.45      362.61      431.08      492.62      550.23      582.48      617.61

PROMEDIOS

16.97      365.94      433.70      493.23      549.30      590.53      621.32

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "H"



PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.72	19500	110.35						
2	182.89	64800			354.30				
3	177.66	75100				422.72			
4	176.72	77800					440.26		
5	176.48	89500						507.14	
6	181.46	94200							519.13
7	176.72	42100		238.24					
8	180.51	24000	132.96						
9*	178.13	86600				486.16			
10*	177.19	93400					527.13		
11*	182.42	78300			429.24				
12*	179.08	107000							597.50
13	179.08	44000		245.70					
14	181.46	91600					504.80		
15*	178.84	96300						538.46	
16	176.24	101400							575.34
17	176.48	91800						520.17	
18	176.01	80200					455.66		

\* Sumergidos en agua.

121.65    241.97    391.77    454.44    481.96    521.93    563.99

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "I"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	179.08	20000	111.68						
20	176.48	70200			397.78				
21*	176.72	83000				469.68			
22*	181.46	92500					509.76		
23*	176.48	96400						546.24	
24*	179.08	98300							548.92
25	179.08	91800						512.62	
26	176.48	77100					436.88		
27	181.46	77300				425.99			
28	178.60	88500					495.51		
29	179.08	67600			377.49				
30*	177.19	47800		269.77					
31	176.24	23800	135.04						
32	176.24	43600		247.38					
33	176.72	95800							542.12
34	178.60	92300						516.78	
35*	181.46	103100							568.17
36*	176.48	92600						524.71	

\* Sumergidos en agua.

123.36    258.58    387.63    447.84    480.71    525.09    553.07

PROMEDIOS

122.51    250.27    389.70    451.14    481.34    523.51    558.53

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "T"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1*	177.19	83400			470.69				
2*	176.72	86200				487.79			
3	180.98	97000					535.97		
4*	174.37	107200						614.80	
5*	176.48	118000							668.63
6*	179.08	105000						586.33	
7	174.37	116000							665.26
8	176.72	81200			459.50				
9	176.95	80000				452.10			
10	176.95	95200					538.00		
11*	180.51	113000						626.02	
12	179.08	117600							656.69
13	181.46	106400						586.36	
14	174.37	116200							666.41
15	176.72	105800						598.70	
16*	176.48	95300					540.01		
17	176.01	115500							656.22
18	176.24	94600					536.76		

\* Sumergidos en agua

465.09

469.95

537.68

602.44

662.64

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "J"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.48	84000			475.98				
20	176.24	80000				453.92			
21*	178.60	100600					563.25		
22	179.08	110500						617.05	
23	176.01	116000							659.06
24*	176.72	109500						619.64	
25	181.46	101200					557.70		
26	180.98	83200			459.72				
27	177.19	82800				467.30			
28*	176.01	99400					564.74		
29*	181.46	112500						619.98	
30*	177.19	119300							673.30
31	179.08	110100						614.81	
32	178.60	99900					559.33		
33	176.01	105700						600.54	
34*	174.37	118300							678.46
35	176.01	106300						603.95	
36	178.60	119900							671.31

467.85      460.61      561.26      612.66      670.53

\* Sumergidos en agua

PROMEDIOS

466.47      465.28      549.47      607.55      666.59

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "J"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.24	45800	259.87						
2*	180.98	68600		379.04					
3	177.90	73100			410.92				
4	178.37	92200				516.91			
5	179.08	99400					555.06		
6*	180.51	103000						570.62	
7*	176.72	107000							605.49
8	176.01	41800	237.49						
9	174.37	62000		355.57					
10*	178.13	79000			443.49				
11	181.94	94400				518.86			
12	176.48	97500					552.47		
13	181.46	102800						566.52	
14	176.72	103400							585.12
15*	179.08	100900					563.44		
16*	178.60	101700						569.41	
17	176.48	105000							594.97
18	181.46	100900						556.05	
* Sumergidos en agua			248.68	367.31	427.20	517.89	556.99	565.65	595.20

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "K"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	37500	212.21						
20	178.60	59900		335.38					
21	179.08	68100			380.28				
22	176.48	86900				492.41			
23*	176.01	98500					559.63		
24*	176.48	100000						566.64	
25	176.01	105600							599.97
26	181.46	34600	190.68						
27	179.08	61300		342.31					
28*	178.60	70300			393.61				
29	176.01	87400				496.57			
30	176.48	96100					544.54		
31*	179.08	101400						566.23	
32	178.60	108300							606.37
33*	176.72	97700					552.87		
34	176.01	98800						561.34	
35*	179.08	109500							611.46
36	176.24	106000							601.44

\* Sumergidos en agua.

201.44      338.84      386.94      494.49      552.35      564.73      604.81

PROMEDIOS

225.06      353.08      407.07      506.19      554.67      565.19      600.00

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "K"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	178.37	48700	273.03						
2	173.67	57500		331.10					
3*	175.77	74400			423.27				
4	174.84	95000				543.37			
5	174.37	101600					582.68		
6	176.72	104800						593.05	
7*	174.37	108900							624.55
8	181.46	112200							618.32
9	175.77	106300						604.75	
10	181.46	106000					584.15		
11*	179.08	97700				545.57			
12	178.37	72400			405.90				
13*	175.77	70000		398.24					
14	176.72	45700	258.61						
15*	175.54	112000							638.04
16	178.60	107200						600.21	
17*	179.08	104800					585.22		
18	181.46	109400							602.89

\* Sumergidos en agua.

265.82    364.67    414.59    544.47    584.02    599.34    620.95

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "L"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	46300	262.00						
20	179.08	67600		377.49					
21	178.37	74800			419.36				
22*	174.37	98600				565.48			
23	176.01	100900					573.27		
24	176.72	107600						608.89	
25	179.08	110900							619.28
26	174.37	47600	272.99						
27	176.48	66500		376.81					
28	176.01	72900			414.18				
29	178.37	97400				546.06			
30*	176.24	104300					591.79		
31	179.08	106700						595.83	
32	181.46	111400							613.91
33*	176.24	105200					596.90		
34*	178.37	109500						613.90	
35*	176.72	112100							634.35
36*	176.24	111800							634.35

\* Sumergidos en agua.

267.50      377.15      416.77      555.77      587.32      606.20      625.47

PROMEDIOS

266.66      370.91      415.68      550.12      585.67      602.77      623.21

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "L"



PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	176.24	4000	22.70						
2	175.07	69200			395.27				
3	183.37	100100				545.88			
4*	181.46	110000					606.20		
5*	174.84	113100						646.90	
6	177.90	126800							712.78
7	177.90	26100		146.72					
8	176.95	25200		142.41					
9*	176.24	74600			423.28				
10*	178.84	99000				553.56			
11	174.37	104000					596.44		
12	174.37	112000						642.32	
13	175.54	124800							710.95
14	176.01	112700						640.31	
15*	179.08	109000					608.67		
16*	176.24	125800							713.78
17*	176.72	114000						645.11	
18	176.01	106500					605.08		

\* Sumergidos en agua.

22.70      144.56      409.27      549.72      604.10      643.66      712.51

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "M"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	179.08	4300	24.01						
20	181.46	24200		133.36					
21*	176.24	78000			442.57				
22	176.72	95000				537.59			
23	179.08	104000					580.75		
24	177.90	110600						621.71	
25*	174.37	123000							705.41
26	174.37	24800		142.23					
27	174.84	65400			374.07				
28*	176.24	97300				552.08			
29	175.54	103000					586.76		
30	176.95	111400						629.55	
31	178.84	125800							703.41
32*	177.90	106300					597.54		
33	176.72	112400						636.05	
34*	176.48	124600							706.03
35*	176.24	104900					595.20		
36	176.72	111800						632.66	

\* Sumergidos en agua.

24.01      137.80      408.32      544.83      590.06      629.99      704.95

PROMEDIOS

23.35      141.18      408.80      547.28      597.08      636.83      708.73

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "M"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	183.85	78000			424.25				
2*	180.51	97000				537.38			
3	177.90	96600					543.02		
4*	174.37	113000						648.06	
5*	173.20	120400							695.16
6	179.79	79000			439.40				
7	180.51	92200				510.79			
8	179.79	96800					538.40		
9	174.37	110800						635.44	
10	174.37	116000							665.26
11	176.72	78100			441.95				
12*	176.72	95400				539.85			
13*	176.72	98100					555.13		
14	176.72	112200						634.92	
15	176.72	114800							649.63
16	174.37	95900					549.99		
17	179.08	112900						630.45	
18*	175.54	119600							681.33
* Sumergidos en agua.					435.20	529.34	546.64	637.22	672.85

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "N"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	6 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19*	173.20	79200			457.28				
20	180.51	93800				519.65			
21	181.46	97300					536.21		
22*	174.37	112800						646.91	
23	181.46	125000							688.86
24	174.37	77700			445.61				
25*	174.37	94600				542.53			
26	179.79	99000					550.64		
27	176.72	111900						633.22	
28	177.90	120400							676.80
29	180.51	77900			431.57				
30	176.72	93900				531.36			
31*	175.54	98300					559.99		
32	176.72	111600						631.53	
33*	176.01	124300							706.21
34	179.08	97900					546.69		
35*	176.24	113200						642.29	
36	176.48	118200							669.77

\* Sumergidos en agua.

444.82    531.18    548.38    638.49    685.41

PROMEDIOS

440.01    530.26    547.51    637.85    679.13

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "N"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	175.54	28750	163.78						
2	180.51	67000		371.18					
3*	181.46	89000			490.47				
4*	174.37	98000				562.03			
5*	179.79	114800					638.52		
6*	178.37	121400						680.61	
7*	178.84	130600							730.25
8	185.06	34400	185.89						
9	176.72	67100		379.71					
10	180.51	85400			473.12				
11	174.37	92800				532.21			
12	179.08	113400					633.24		
13	177.90	119900						673.99	
14	176.72	129000							729.99
15	174.37	127000							728.35
16	176.48	118800						673.17	
17	176.72	111200					629.26		
18	179.08	120000						670.10	

\* Sumergidos en agua.

174.83    375.44    481.79    547.12    633.67    674.47    729.53

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "O"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	31700	179.38						
20*	179.08	68500		382.51					
21	176.48	86400			489.58				
22*	176.01	97500				553.95			
23	179.08	111100					620.40		
24*	176.24	119800						679.74	
25*	176.48	129200							732.10
26	179.08	32800	183.16						
27	181.46	65900		363.17					
28	179.08	87500			488.61				
29	176.24	94600				536.76			
30	174.37	110900					636.02		
31	179.08	118800						663.39	
32*	176.72	130100							736.21
33	176.24	118700						673.50	
34	179.08	114000					636.59		
35*	176.72	129800							734.52
36*	176.01	119200						677.24	

\* Sumergidos en agua.

181.27    372.84    489.09    545.35    631.00    673.47    734.28

PROMEDIOS

178.05    374.14    485.44    546.24    632.34    673.97    731.90

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "O"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	178.37	74800	419.36						
2	176.72	81200		459.50					
3	180.98	109200			603.38				
4*	175.54	113600				647.15			
5	174.37	116200					666.41		
6	171.80	127300						740.97	
7*	176.48	138800							786.49
8	174.37	73800	423.25						
9*	183.37	85600		466.81					
10*	176.48	110600			626.70				
11	182.65	114400				626.32			
12*	175.54	117800					671.08		
13	179.08	133300						744.36	
14	175.54	136000							774.76
15*	176.72	139300							788.27
16	175.07	130000						742.56	
17	174.37	115700					663.54		
18	176.72	116500					659.25		

\* Sumergidos en agua.

421.30    463.15    615.04    636.73    665.07    742.63    783.18

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "P"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19	176.72	74600	422.15						
20*	179.08	83500		466.27					
21	176.24	105800			600.30				
22*	175.54	111700				636.33			
23*	179.08	119700					668.42		
24*	181.46	136300						751.13	
25*	176.72	138500							783.75
26*	179.08	140400							784.01
27	174.37	72200	414.07						
28	176.01	79300		450.55					
29	176.72	106700			603.80				
30	176.24	110800				628.67			
31	181.46	119000					655.80		
32	178.60	131300						735.14	
33*	176.72	139200							787.71
34	175.54	135900							774.19
35	178.60	117600					658.44		
36*	180.27	134100						743.90	

\* Sumergidos en agua.

418.11    458.41    602.05    632.50    660.88    743.39    782.41

PROMEDIOS

419.71    460.78    608.54    634.62    662.98    743.01    782.79

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "P"



PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
1	177.66	117800			663.07				
2*	174.37	114800				658.38			
3	180.27	128400					712.28		
4*	180.27	119400				662.35			
5*	174.37	126200					723.76		
6	175.54	135000						769.06	
7*	176.72	142800							808.08
8	180.74	101200			559.91				
9	179.08	112800				629.89			
10*	181.46	131000					721.93		
11	180.27	128800					714.50		
12*	181.46	146600						807.90	
13	180.27	130000						721.15	
14	176.48	140900							798.39
15	178.60	113600				636.04			
16	176.24	123100					698.46		
17	176.01	130600						742.01	
18	179.08	143200							799.65
* Sumergidos en agua.					611.49	646.67	714.19	760.03	802.04

PRIMERA PARTE DE LA MEZCLA "Q"

PROBETA NÚMERO	ÁREA PROMEDIO	CARGA (kg)	1 DÍA	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS	91 DÍAS
19*	176.72	111800			632.66				
20	176.24	113900				646.26			
21	179.08	127600					712.53		
22	178.60	133700						748.58	
23	176.01	140600							798.82
24	180.27	112300			622.96				
25	181.46	114800				632.65			
26	176.48	124700					706.60		
27*	176.72	135500						766.77	
28	179.08	142100							793.50
29	176.01	110200			626.10				
30*	176.48	115600				655.03			
31	179.08	126100					704.16		
32	176.24	133100						755.20	
33*	178.60	143200							801.77
34	176.48	125300					710.00		
35*	176.72	134800						762.81	
36*	181.46	146300							806.24

\* Sumergidos en agua.

627.24    644.65    708.32    758.34    800.09

PROMEDIOS

619.37    645.66    711.25    759.19    801.06

SEGUNDA PARTE Y PROMEDIOS DE LA MEZCLA "Q"