

95



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

P R E S E N T A :

JAIME ENRIQUE MORENO GARCÍA

300191

DIRECTOR DE TESIS: M.I. CARLOS GÓMEZ TOLEDO



MEXICO, D.F.

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA Y GEODESICA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA**

**Tema: Concretos Autocompactables**

Director de Tesis

M. I. Carlos Gómez Toledo

Tesista

Jaime Enrique Moreno García

# DEDICATORIA.

## A MI PADRE

Papá, gracias a ti estudié esta maravillosa carrera, fuiste mi ejemplo y mi modelo a seguir, desde que recuerdo te he admirado. Esta tesis es también tuya, ya que con tu ayuda, apoyo, esfuerzo, me has encaminado a lograr mis metas...gracias.

## A MI MADRE

Mama, tu has sido ejemplo de fortaleza, tenacidad, generosidad y tantas otras virtudes que no podría acabar de numerar. Gracias a ti soy lo que soy. Gracias por tu incansable apoyo y confianza en mi, te quiero mucho.

## A MI HERMANO

Felipe, muchas gracias por ser mi amigo, compañero, mi hermano, no se te olvide que siempre estaré contigo para lo que necesites, como tu lo has estado conmigo. Te quiero mucho.

## A EILEEN, MI ESPOSA

Te dedico esta tesis, que simboliza todo el esfuerzo que realizamos durante los cinco años que estudié la licenciatura de Ingeniería Civil. En este tiempo hemos compartido muchas aventuras y logros, en los cuales siempre he tenido tu amor, apoyo y ayuda. Estoy seguro que el camino recorrido lo hubiera podido andar solo, pero no hubiera sido tan enriquecedor y divertido. En ti encontré la fuerza en los momentos de flaqueza, la alegría en los momentos amargos y sobre todo, a tu lado encontré un mejor sentido para mi vida. Se que estarás en mi corazón por siempre, ya que has dejado huella en mi. Nunca podré expresar con palabras lo mucho que te agradezco el cambio y chispa que has agregado a mi vida. Te amo.

#### A MI HIJA

Eres nuestro tesoro, y la alegría más grande de nuestras vidas. Te quiero con todo mi corazón

#### A MIS AMIGOS

Agradezco a mis amigos por darme una vida llena de recuerdos alegres que jamás olvidaré. Aquellos días de trabajo interminable, aquel chiste que saco una sonrisa de mi rostro, siempre estarán en los recuerdos más alegres de mi vida.

#### A LOS SEÑORES VERA

Muchas gracias por toda su ayuda, ya que sin su apoyo este logro jamás hubiera sido posible. Siempre estarán en mi corazón.

## AGRADECIMIENTOS.

### A LA FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

Por darme una formación integral para poder infundir en nuestro mundo un cambio. Ahora tengo un compromiso con mi país y con mi Alma Mater de lograr ese cambio. Jamás podré olvidar todos esos bellos momentos que viví en este recinto y mucho menos dejar pasar un día sin recordarlos.

### AL PROGRAMA DE ALTO RENDIMIENTO ACADEMICO

Por brindarme la oportunidad de tener una formación más completa y la oportunidad de conocer a una gran persona, Manuel García Flores, a quien le agradezco inmensamente el tiempo que me dedicó para ser más que un tutor, un amigo. De igual forma a Lidia Delgado por todas sus atenciones y ayuda en todo momento.

### AL GRUPO APASCO

Quiero agradecer el apoyo que recibí del Grupo Apasco, en especial del ingeniero Carlos Gómez Toledo que en todo momento me apoyó para poder lograr este proyecto, tanto en la parte material, como en el amplio conocimiento que me supo impartir. De igual manera quiero agradecer al Centro Tecnológico del Concreto las facilidades que me dieron para el logro de esta tesis.

### A MASTER BUILDERS TECHNOLOGY

Por su apoyo y ayuda para poder lograr esta tesis.

### A EUCOMEX

Por su apoyo y ayuda para poder lograr esta tesis.

### AL ACI

Por darme la oportunidad de aprender de ustedes y ayudarme en todo momento. Muchas gracias.

# ÍNDICE

Introducción	1
<b>Capítulo A. Antecedentes.</b>	<b>2</b>
A. A. Concreto.	2
A. A. A. Importancia.	2
A. A. B. Desarrollo a través de la historia.	2
A. A. B. A. American Society for Testing Materials (ASTM).	3
A. A. B. B. American Concrete Institute (ACI).	4
A. A. C. Materiales Principales.	5
A. A. C. A. Cemento.	5
A. A. C. B. Agregados.	9
A. A. C. C. Agua.	10
A. A. C. D. Aditivos.	11
A. A. C. D. A. Aditivos Químicos.	11
A. A. C. D. B. Aditivos Minerales.	13
A. A. D. Relación Agua/Cementantes.	14
A. A. E. Fraguado.	16
A. A. E. A. Fraguado Falso.	16
A. A. E. B. Fraguado Inicial y Final.	16
A. A. F. Curado.	17
A. A. F. A. Métodos de curado.	18
A. B. Concretos Autonivelantes y Superfluidos.	18
<b>Capítulo I. Características Generales de los Concretos Autocompactables.</b>	<b>19</b>
I. I. Características Principales.	20
I. I. I. Propiedades en Estado Fresco.	21
I. I. II. Propiedades en Estado Endurecido.	23
I. I. III. Materiales Para su Elaboración.	24
I. I. IV. Metodología para su obtención.	24
I. II. Situación Actual en el Mundo y en México.	25
I. II. I. Experiencias en Japón.	25
I. II. II. Experiencias en Suiza.	27
I. II. III. Experiencias en Francia.	28
I. II. IV. Desarrollo en México.	29
<b>Capítulo II. Obtención de Concretos Autocompactables.</b>	<b>31</b>
II. I. Metodología del diseño de Mezclas.	31
II. I. I. Metodología de Takeshit et al.	31
II. I. II. Metodología de Okamura y Ozawa.	32
II. I. III. Metodología de Shindo y Matsuoka.	32
II. II. Pruebas Normales Concretos Autocompactables.	32
II. II. I. Prueba Slump Flow.	33
II. II. II. Prueba del Embudo Tipo V.	34
II. II. III. Prueba U Modificada.	35
II. II. IV. Prueba de la Caja L.	36
II. II. V. Prueba <i>In Situ</i> Propuesta por Okamura.	37
II. III. Pruebas Alternas.	38
II. IV. Determinación del concreto autocompactable	38

<b>Capítulo III. Control de Experimentos y Trabajo en Laboratorio.</b>	<b>40</b>
III.I. Materiales.	40
III.I.I. Cementantes.	40
III.I.II. Agregados.	40
III.I.III. Aditivos.	41
III.II. Metodología.	41
III.III. Especificaciones para la Preparación de las Mezclas.	42
III.IV. Pruebas Realizadas a las Mezclas.	45
III.V. Especificaciones de Curado.	47
III.VI. Resultados Obtenidos en el Laboratorio.	48
III.VI.I. Características Generales de los Materiales.	48
III.VI.II. Proporciones de las Mezclas Realizadas.	49
III.VI.III. Resultados de las Mezclas Autocompactables.	53
<b>Capítulo IV. Análisis de Costos.</b>	<b>59</b>
IV.I. Similitudes y Diferencias Generales.	59
IV.II. Características de Mezclas Tipo con Resistencia de $f'_c = 30$ MPa.	59
IV.III. Personal, Equipo y Tiempo Aproximado Requerido para la Colocación y Terminados, por Metro Cúbico.	60
IV.IV. Costos de los Materiales, Aparatos y Personal.	61
IV.V. Comparativo de Costos de Concreto Normal y Concreto Autocompactable.	61
<b>Capítulo V. Análisis de Sensibilidad.</b>	<b>63</b>
V.I. Análisis de los indicadores del comportamiento Económico del Concreto a través del Tiempo.	63
V.II. Indicadores de Variaciones del Comportamiento del Concreto a Través del Tiempo.	66
V.II.I. Índice Nacional de Precios al Consumidor.	66
V.II.II. Índice Nacional del Costo de Edificación de la Vivienda de Interés Social.	67
V.III. Valuación Económica en el Tiempo de los Dos tipos de Concreto.	69
V.III.I. Comportamiento de los Costos Utilizando las Variaciones del Tipo de Cambio de Dólares vs. Pesos Mexicanos y el INPC.	70
V.III.II. Comportamiento de los Costos Utilizando las Variaciones del Tipo de Cambio de Dólares vs. Pesos Mexicanos y el INCEVIS.	72
V.III.III. Comportamiento de los Costos Utilizando las Variaciones del Tipo de Cambio de Dólares vs. Pesos Mexicanos y los Subíndices de Materiales y Mano de Obra del INCEVIS.	75
V.III.IV. Comportamiento de los Costos Utilizando las Variaciones del Tipo de Cambio de Dólares vs. Pesos Mexicanos y los Conceptos Individuales del INCEVIS.	77
V.IV. Predicciones del comportamiento de los Costos Utilizando el INCEVIS, INPC y el Tipo de Cambio.	79
V.IV.I. Proyección Esperada Utilizando el INPC y el Tipo de Cambio.	80
V.IV.II. Proyección Esperada Utilizando el INCEVIS y el Tipo de Cambio.	81
V.IV.III. Proyección Esperada Utilizando los Subíndices del INCEVIS y el Tipo de Cambio.	82

<b>Capítulo VI. Discusión de Resultados.</b>	<b>84</b>
<b>Capítulo VII. Conclusiones</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>90</b>

## INTRODUCCIÓN.

El hombre ha desarrollado una gran variedad de tecnologías al interactuar con su medio circundante para poder adaptarse mejor a este, haciendo cambios radicales en muchos aspectos de su entorno. Muchos de estos cambios han representado avances significativos en el desarrollo de la humanidad, pero algunos han tenido efectos adversos a los esperados o se les ha hecho a un lado porque no se les ha visto una aplicación y por tanto no se han usado para el desarrollo de la humanidad. Existiendo varios casos, en los que después de mucho tiempo, se encuentra la potencialidad de estos descubrimientos dándoles un uso extensivo.

El Ingeniero Civil debe procurar que los cambios hechos al medio ambiente sean lo menos dañinos para los ecosistemas a los que transforman y que proporcionen beneficios al mayor número de personas posibles utilizando la menor cantidad de recursos posibles. Para poder cumplir con este propósito, se debe utilizar la mejor y más adecuada tecnología con que se disponga sin perder de vista el aspecto económico en todo momento ya que vivimos en un mundo capitalista.

Este trabajo lo realizó con el fin de difundir una tecnología de reciente aparición, los **CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**. Investigaré sus fundamentos, su desarrollo y su potencial en México y el mundo, analizando sus ventajas y desventajas principales respecto de concretos "normales".

Primero presentaré algunos conceptos básicos para poder comprender y comparar objetivamente a los concretos autocompactables, y posteriormente expondré ampliamente los conceptos y técnicas para su obtención y utilización.

## **CAPÍTULO A. ANTECEDENTES.**

### **A.A. CONCRETO.**

Se define como concreto a toda piedra artificial integrada por una reagrupación de elementos pétreos naturales, llamados agregados, unidos por productos conglomerantes. Los concretos pueden clasificarse por su componente aglutinante en dos categorías principales: los concretos bituminosos y los no bituminosos. Los concretos bituminosos son aquellos en los que el aglutinante lo forman sustancias compuestas de carbono e hidrógeno, un ejemplo es el asfalto.

El grupo de los concretos no bituminosos está compuesto por elementos como el cemento natural, cemento Portland, cemento con aluminatos, etc.

Normalmente la palabra "Concreto" se refiere al concreto hecho con cemento Portland como conglomerante, aunque su uso correcto debería ser concreto asfáltico o concreto hidráulico, dependiendo del caso.

El concreto hidráulico es la mezcla de cemento, arena, grava y agua. Por sus características en estado fresco, adopta la forma de donde se le haya acomodado y endurece permaneciendo de esta forma y ganando resistencia con el tiempo. Cuando solo se mezcla cemento, arena y agua, se le llama mortero. A la mezcla de cemento y agua se le llama pasta.

### **A.A.A. IMPORTANCIA.**

El concreto ha sido uno de los principales materiales usados para construir la infraestructura de todos los países del mundo, por su gran diversidad de aplicaciones y por tener las características de una roca instantánea y poder adquirir la forma que se requiera. Normalmente se le añade acero, por la baja capacidad del concreto a resistir tensiones, a este concreto se le llama concreto reforzado.

Dentro de los usos más importantes que se le pueden dar al concreto incluyen bloques constructivos prefabricados, postes, durmientes, ladrillos, carpetas para carreteras y aeropuertos, tuberías eléctricas, telefónicas, para suministro de agua y drenaje, edificaciones, y muchas otras. De hecho, se ha llegado a usar hasta en obras de arte. Se puede decir que se le ha encontrado un uso práctico en todas las ramas de la Ingeniería Civil.

El concreto será un material que seguirá siendo un bastión en el desarrollo de la humanidad en el futuro debido a sus características de costo, mantenimiento, vida útil y versatilidad.

### **A.A.B. DESARROLLO A TRAVÉS DE LA HISTORIA.**

El uso del concreto se remonta hasta el antiguo Egipto, que usaban sulfato de cal calcinado para dar a sus estructuras una capa de acabado terso. Los griegos utilizaron piedra caliza calcinada para un uso similar.

Los romanos hicieron un uso más extensivo del concreto, ya que lo usaron en la muralla que rodea Roma, en muchos de sus caminos, acueductos y edificios como el Coliseo. Los romanos utilizaron caliza calcinada, y posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra

Dentro de las tecnologías usadas por los romanos llegaron a incorporar aire y cabello de caballo para darle mayor durabilidad y evitar el encogimiento

De 1756 a 1774 John Smeaton encontró que al combinar puzolana con caliza, que contenía una alta cantidad de material arcilloso, daba un material duro y que podía unir otros materiales. Dentro de sus logros estuvo la construcción del faro de Eddystone en Inglaterra. Posteriormente a Smeaton, James Parker hizo el Cemento Romano a partir de la calcinación de caliza arcillosa. En 1816 el primer puente de concreto no reforzado se construyó en Souillac, Francia.<sup>1</sup>

En 1824 Joseph Aspdin, patentó el "Cemento Portland" que se prepara calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el CO<sub>2</sub>; la temperatura utilizada en esa época era menor a la utilizada actualmente para formar cemento Portland. El nombre de Cemento Portland, se debe principalmente a la semejanza de color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra caliza de Portland, en una cantera de Dorset.<sup>1</sup>

El prototipo del cemento moderno lo obtuvo en 1845 Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta la formación del clinker (al aumentar la temperatura los materiales se fusionan y formando esferas pequeñas llamadas clinker), con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.

En épocas recientes han existido descubrimientos y cambios importantes en la industria del concreto que transformaron para siempre su preparación, uso y calidad final. Desde hace algunos años, existen varias agrupaciones internacionales dedicadas a estudiar y estandarizar tanto las materias primas del concreto como el concreto como producto final. Entre estas encontramos dos que destacan: la Sociedad Americana para Ensayes y Materiales (*American Society for Testing and Materials*) y el Instituto Americano del Concreto (*American Concrete Institute*). En los incisos siguientes describo muy brevemente los objetivos y estructura general de estas dos agrupaciones.

#### A.A.B.A. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM).

En 1898 se creó la *American Society for Testing and Materials* por un grupo de personas interesadas en la ciencia de los materiales. La ASTM es una asociación sin fines de lucro, que provee de un espacio para la divulgación y publicación de estándares, hechos por voluntarios, para materiales, productos, sistemas y servicios. Esta asociación desarrolla estándares, métodos de pruebas, especificaciones, prácticas, guías, clasificaciones y terminología en 130 áreas, que van desde metales, pinturas, plásticos, construcción y hasta sistemas electrónicos<sup>2</sup>.



Sus objetivos<sup>3</sup> son:

- > Promover la seguridad y salud pública, así como mejorar la calidad de vida.
- > Contribuir a que se pueda tener confianza en los materiales, productos, sistemas y servicios.
- > Facilitar el comercio Nacional, Regional e Internacional en todo el mundo.

Los miembros de la ASTM se dividen en tres grupos: productores, consumidores y un grupo conformado por ingenieros, científicos, educadores e investigadores. La actividad de sus miembros puede ser individual o en grupos llamados comités que cada año reportan sus progresos e investigaciones. Los nuevos métodos o especificaciones son revisados por los comités y se mandan como propuestas a la comunidad para su aceptación. Cuando la tentativa es aceptada por la comunidad se transforma en estándar.

<sup>1</sup> Sección centro y sur de México del American Concrete Institute, Técnicos en pruebas de campo para concreto grado 1.

<sup>2</sup> Información obtenida de la dirección electrónica <http://www.astm.org/FAQ/1.html>

<sup>3</sup> Información sacada de la dirección electrónica <http://www.astm.org/News/Mision2.html>

Cada una de estos estándares tiene su propia designación que consiste de una letra y un número seguido por el número del año en que sufrió su última modificación. Quedando estas reglas como referencia en algunos casos, y llegando a ser obligatorias para otros. La ASTM tiene más de diez mil estándares, usados en todas las fases de la manufactura de productos. Además, la ASTM ofrece cursos de capacitación para conocer y poder aplicar sus normas.

Sus oficinas generales se encuentran en  
100 Barr Harbor Drive,  
West Conshohocken, PA 19428-2959  
Pensilvania, Estados Unidos de Norteamérica.

### A.A.B.B. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI).



En 1905 se fundó bajo el nombre de Asociación Nacional de los Usuarios del Cemento y su propósito fue "... dar apoyo al encontrar los mejores medios para hacer trabajos con concreto de todos tipos y esparcir este conocimiento". En 1913 cambia su nombre por el actual.

Los estatutos que rigen actualmente al ACI son "El propósito del Instituto debería ser impulsar la educación técnica y en Ingeniería, investigación científica y el desarrollo de estándares, para el diseño y la construcción, incorporando el concreto y los materiales relacionados". Los estatutos del ACI también contemplan que "... debe promover la tecnología, capacidad técnica, diseño y construcción, para el beneficio de la sociedad".<sup>4</sup>

Es una asociación internacional compuesta por individuos interesados en el concreto, con la principal función de difundir el conocimiento referente al concreto y a los materiales que lo forman. Su lema es "Progreso a través del conocimiento".

Su manera de actuar se basa en la estrategia de comités y subcomités voluntarios que se encargan de temas específicos y la gente con mayor experiencia e interés en ellos son los que participan activamente, estando abiertos a la participación de cualquier miembro de la comunidad. Se reúnen semestralmente para intercambiar la información obtenida en ese periodo y dar dictámenes de los comités. Además, bimestralmente publican un *Journal* que contiene información de investigaciones de punta en el mundo, de los que se basan para hacer los cambios y altas de los procedimientos de ese año.

Para difundir el conocimiento, esta asociación cuenta con grupos regionales dedicados a difundir el conocimiento obtenido a través del tiempo y a impartir cursos de capacitación técnica y difusión de nuevas tecnologías.

Las normas del ACI son unas de las más usadas respecto al uso, aplicaciones, métodos, guías y cursos tecnológicos referentes al concreto y los materiales relacionados con él, en todos los aspectos de su aplicación.

Sus oficinas generales se encuentran en:  
38 800 Country Club Drive  
Farmington Hills, MI 48 331  
Michigan, Estados Unidos de Norteamérica.

Su dirección electrónica es:  
<http://www.aci-int.org/>

<sup>4</sup> Esta información proviene de la página electrónica <http://www.aci-int.org/AboutACI-Mission.htm>

## A.A.C. MATERIALES PRINCIPALES.

Los principales constituyentes del concreto son cemento, agregados, agua y aditivos. Las propiedades de los concretos están directamente relacionadas con los materiales utilizados, sus proporciones por unidad de volumen en la mezcla y por la variación en la calidad de los mismos. Las principales características y propiedades de estos materiales se describen en este apartado

### A.A.C.A. CEMENTO.

Debido a que la definición de cementos se refiere a materiales que tienen propiedades tanto cohesivas como adhesivas para aglutinar otros materiales y formar una pieza compacta, existe una gran cantidad de materiales que cumplen con esta función.

Como ejemplo de la diversidad de cementos encontramos: el cemento Portland ordinario, el cemento Portland de endurecimiento rápido, el cemento Portland de endurecimiento extra rápido, el cemento Portland de resistencia alta a edades tempranas, el cemento Portland de bajo calor de hidratación, el cemento Portland resistente a los sulfatos, el cemento Portland blanco, el cemento de escoria, el cemento sobre sulfatado, el cemento antibacterial, el cemento hidrófobo, el cemento de alta alúmina, etc. Para el objetivo de éste escrito sólo se hablará de los cementos hidráulicos.

Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal. En general se clasifican en: cementos naturales, cementos Portland y cementos de alúmina. El que ha tenido un mayor uso es el cemento Portland, ya que los materiales necesarios para su elaboración se encuentran en casi cualquier parte del mundo.

El cemento Portland se forma de materiales calcáreos (provenientes normalmente de rocas de caliza), por aluminatos y sílice (los dos últimos se obtienen de arcilla o pizarra). Los cementos Portland se fabrican mediante dos métodos, el húmedo y el seco. Los procesos para su fabricación son esencialmente los mismos y consisten en términos generales en 6 procesos básicos:

1. Moler finamente la materia prima.
2. Mezclar totalmente los componentes en proporciones correctas.
3. Calcinar la mezcla en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1 500°C.
4. Al fundirse parcialmente la materia prima, se forman unas "esferas" llamadas clinker que se sacan del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente.
5. Se tritura hasta obtener un polvo fino.
6. Se le adiciona un poco de yeso (3 a 4 por ciento) y está listo el producto final.

Se suelen considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento. A los óxidos que forman los componentes principales del concreto los químicos del concreto les dan una notación abreviada, esta notación aparece en la tabla A.1<sup>5</sup>. Los principales compuestos del concreto aparecen en la tabla A.2<sup>5</sup>, junto con la notación abreviada que reciben.

Tabla A.1. Abreviaturas de los principales óxidos del cemento una vez hidratado.

Óxido	Abreviatura
CaO	C
SiO <sub>2</sub>	S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
H <sub>2</sub> O*	H
SO <sub>3</sub> *	S

<sup>5</sup> Adam M. Neville. Tecnología del concreto. IMCIC. México D F 1999 1ª edición.

Tabla A.2. Compuestos principales y su abreviatura.

Compuestos principales del cemento Portland		
Nombre del compuesto	Composición	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrita tetracálcica	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Además de los compuestos principales existen otros compuestos en menor proporción como son  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ . De estos compuestos el  $\text{K}_2\text{O}$  y el  $\text{Na}_2\text{O}$  pueden reaccionar con algunos agregados ya que tienen tendencia alcalina (en el cemento estos no son los únicos compuestos alcalinos pero si los de mayor presencia). Al reaccionar con el agregado producen la desintegración del concreto. En la tabla A.3, que se encuentra a continuación, se ilustran los límites normales del cemento Portland<sup>5</sup>.

Tabla A.3. Límites porcentuales de componentes para el cemento Portland.

Límites de composición para cemento Portland.	
Oxido	Contenido [%]
CaO	60 – 67
$\text{SiO}_2$	17 – 25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3 – 8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 – 6
MgO	0.5 – 4
Alcalis	0.3 – 1.2
$\text{SO}_3$	2 – 3.5

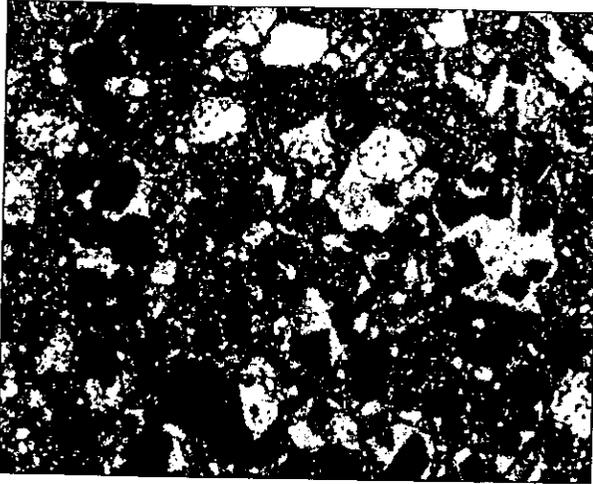
Durante mucho tiempo se ha intentado estudiar las propiedades que tienen los materiales cementantes en su conjunto y sus componentes químicos por separado. En recientes fechas investigadores del *National Institute of Standards and Technology* (NIST) han desarrollado nuevas técnicas para hacer imágenes de la compleja microestructura de materiales cementantes y así poder estudiar los fenómenos relacionados con la hidratación de éstos de una manera muy precisa a través del tiempo.

Estas técnicas se llaman "*Scanning Electron Microscopy and X-Ray imaging techniques*" y usan la información de un Scanner electrónico que realiza barridos electrónicos, a diferentes frecuencias, sobre una muestra del material en estudio e imágenes apropiadas de Rayos X para hacer una precisa segmentación de los componentes del material analizado en el plano.

Al obtener los diversos barridos del microscopio electrónico y conjuntarse con las imágenes de rayos X se forma una imagen basada en puntos que es filtrada y analizada cuidadosamente para generar imágenes complejas de la estructura del material analizado.

Las imágenes obtenidas proveen las características cuantitativas para poder desarrollar modelos tridimensionales en computadora de la hidratación del cemento y la formación de la microestructura tanto del material seco como hidratado.

Utilizando la técnica "*Scanning Electron Microscopy and X-Ray imaging techniques*" se han hecho imágenes de materiales como: polvo de cemento, ceniza volante. A continuación presento una de estas imágenes como ejemplo de los resultados obtenidos por los investigadores del NIST, esta imagen corresponde al análisis de una muestra de cemento Portland de  $200 \times 10^{-6} \text{ m}$  ( $200 \mu\text{m}$ ) por  $256 \times 10^{-6} \text{ m}$  ( $256 \mu\text{m}$ )



Esta imagen corresponde a los resultados obtenidos por la técnica SEM/X-Ray en dos dimensiones para cemento Portland de una finura de  $197 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Las dimensiones reales de la fotografía son  $256 \mu\text{m}$  por  $200 \mu\text{m}$ . Los colores simbolizan un compuesto en específico, Rojo= $\text{C}_3\text{S}$ , Cian= $\text{C}_2\text{S}$ , Verde Oscuro= $\text{C}_3\text{A}$ , Verde Claro=Sulfatos de Calcio, Amarillo= $\text{K}_2\text{SO}_4$  y Blanco=Caliza Libre.<sup>6</sup>

En esta imagen se puede apreciar de manera sencilla los compuestos que componen esta muestra y su distribución general. Al utilizar varias de estas imágenes bidimensionales se puede generar una imagen tridimensional y tener una mejor idea de las características físicas y químicas de cualquier muestra.

El cemento Portland por si solo no sirve para aglutinar, necesita del agua para que reaccionen sus componentes y formen enlaces entre las partículas y se endurezcan. A la unión de cemento con agua se le llama pasta. Cuando se pone en contacto a los granos de cemento con el agua, la hidratación superficial en algunos de estos granos es inmediata, pero la hidratación profunda requiere un tiempo considerable. De hecho, Powers<sup>7</sup> encontró que únicamente las partículas de diámetros menores a  $50 \times 10^{-6} \text{ m}$  ( $50 \mu\text{m}$ ) se hidratan completamente en condiciones normales.

Al hidratarse el cemento se forman hidratos, los principales son los hidratos de silicato de calcio e hidratos de aluminato tricálcico. Los compuestos principales del cemento reaccionan de maneras diferentes al hidratarse, aquí citaremos brevemente su comportamiento.

- > El silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) se hidrata y endurece rápidamente formando hidróxidos de calcio, por lo que es responsable en gran medida del fraguado inicial y la resistencia que tenga el concreto a edades cortas.
- > El silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) se hidrata y endurece de manera más lenta, formando hidratos de silicato de calcio, con lo que contribuye al incremento de resistencia en tiempos mayores de una semana.
- > Al hidratarse el aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) libera una gran cantidad de calor a la que debemos los incrementos generales de temperatura de la masa de concreto. Este calor puede generar una gran cantidad de problemas en el concreto si el gradiente térmico es muy grande. Como medida para retrasar la hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  se le añade el yeso a la molienda final de la materia prima del cemento, que al combinarse entre ellos y el agua forman hidratos de sulfoaluminato de calcio. Un alto contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  ayuda a un fraguado rápido y un bajo contenido da una mayor resistencia al ataque de sulfatos.
- > El aluminoferrito tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) participa activamente en la actividad fundente, lo que sirve para bajar la temperatura de formación del clinker. Al hidratarse el  $\text{C}_4\text{AF}$  forma hidrato de aluminoferrito

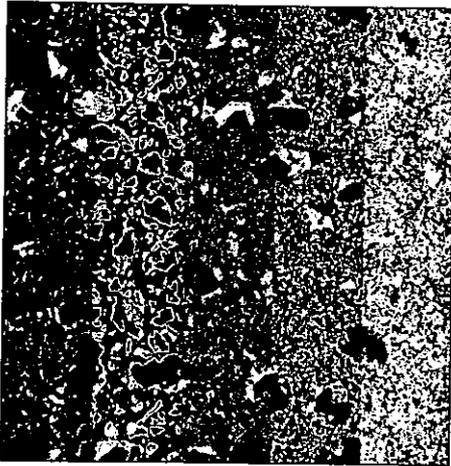
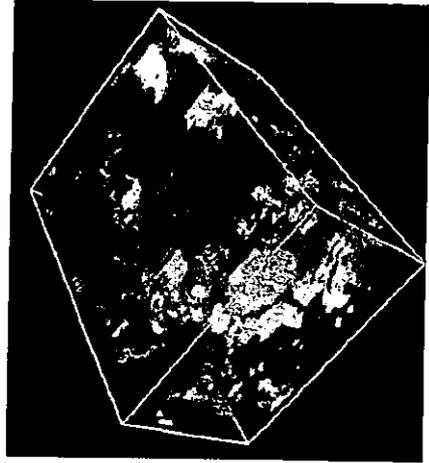
<sup>6</sup> D.P. Bentz, P.E. Stutzman, C.J. Haecker, y S. Remond, *SEM/X-ray imaging of cement-based materials, Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Eds. H.S. Pietersen, J.A. Larbi, y H.H.A. Janssen, Delft University of Technology, pp. 457-466 (1999).

<sup>7</sup> T. C. Powers. *The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste, its significance for concrete research and its method of determination*. ASTM Bul. Núm. 158 (mayo 1949)

de calcio que no contribuye de manera importante a la resistencia pero si influye en el color final tanto del cemento como del concreto

A continuación se presentan imágenes que ilustran los compuestos del cemento y sus proporciones iniciales, así como los cambios que sufre el cemento al hidratarse y su estructura final

Imagen en 3-D para un cemento iniciando su reacción con el agua a una relación  $W/C=0.4$ . El silicato tricálcico está en color rojo, el silicato dicálcico está en azul, el aluminato tricálcico está en verde, la aluminoferrita tetracálcica en naranja y el yeso en verde claro.<sup>6</sup>



Esta ilustración muestra varios pasos en la hidratación del cemento digitalizados. Las imágenes aparecen de izquierda a derecha respecto a su hidratación, dando en la extrema izquierda una imagen de las partículas iniciales de cemento y agua (en negro), luego una imagen donde la superficie de las partículas de cemento en contacto con el agua aparece resaltada (en blanco), el comienzo de la hidratación interior de las partículas del cemento y por último dos imágenes donde la hidratación de las partículas es al 32% y 76% de la hidratación final, respectivamente. El  $C_3S$  aparece en rojo, el  $C_2S$  en azul, el  $C_3A$  en verde brillante, el  $C_4AF$  en naranja, el Yeso en Verde pálido, C-S-H en amarillo, el CH en azul oscuro y los aluminatos productos de la hidratación en verde.<sup>6</sup>

El cemento es uno de los componentes de mayor importancia en el concreto, ya que en la mayoría de los casos representa un alto porcentaje del costo total del concreto, por lo que tiene especial importancia tanto sus propiedades como el estudio de éstas. De hecho, alrededor del mundo existen varias asociaciones dedicadas a crear normas para el control de las propiedades del cemento. Una de estas agrupaciones es la ASTM, que ha generado una gran cantidad de normas que regulan al concreto y sus materiales integrantes. En la tabla A.4. se presentan las principales normativas hechas por la ASTM para los cementos.

<sup>6</sup> D.P. Bentz, P.E. Stutzman, C.J. Haecker, y S. Remond. SEM/X-ray imaging of cement-based materials. Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Eds: H.S. Pietersen, J.A. Larbi, y H.H.A. Janssen, De Techn. University of Technology, pp. 457-466 (1999).

Tabla A.4. Principales especificaciones ASTM para el cemento.

Número de Especificación	Objetivo de la Norma
ASTM C-150	Especificaciones para cemento Portland.
ASTM C-595	Especificaciones para cementos hidráulicos mezclados.
ASTM C-183	Muestras del cemento.
ASTM C-115	Finura por medio de turbidímetro Wagner.
ASTM C-204	Finura por medio del ensaye de Blaine.
ASTM C-430	Finura por medio de la malla 0.045 mm.
ASTM C-151	Sanidad por el método de expansión en el autoclave.
ASTM C-230	Consistencia por la prueba de fluidez.
ASTM C-191	Tiempo de fraguado con el aparato de Vicat.
ASTM C-451	Fraguado falso de la pasta.
ASTM C-359	Fraguado falso del mortero.
ASTM C-109	Resistencia a la compresión; cubos de 50 mm x 50 mm.
ASTM C-186	Calor de hidratación.
ASTM C-114	Perdida por ignición.
ASTM C-188	Peso específico.

#### A.A.C.B. AGREGADOS.

En volumen es el componente principal del concreto, normalmente forma  $\frac{3}{4}$  partes del volumen total. Por esta razón son parte importante en las características tanto físicas, químicas y en su comportamiento mecánico. De hecho, pueden limitar en la resistencia del concreto, así como en el peso, durabilidad, etc. Se debe cuidar que los agregados no tengan materiales nocivos para el concreto, como arcillas, partículas suaves, materia orgánica, y partículas reactivas a los álcalis o carbonatos.

Los agregados son más baratos con respecto al cemento, por lo que en toda mezcla se debe tratar de tener un alto contenido de ellos para tener un concreto más económico. Además, altos contenidos de agregados de buena calidad proporcionan mayor durabilidad y mayor estabilidad volumétrica. Las especificaciones que regulan calidad de los agregados se encuentran en las normas ASTM C-33 (para agregados de masa normal) y ASTM C-330 (para agregados ligeros). El resto de las principales normatividades que se le hacen a los agregados se encuentran en la tabla A.5.

Tabla A.5. Pruebas ASTM para los agregados.

Prueba	Objetivo de la norma
ASTM C-136	Granulometría.
ASTM C-29	Masa volumétrica.
ASTM C-127	Masa específica y absorción de arenas.
ASTM C-128	Masa específica y absorción de gravas.
ASTM C-40	Impurezas orgánicas.
ASTM C-88	Sanidad de los agregados.
ASTM C-117	Materiales más finos que la criba 75 $\mu\text{m}$
ASTM C-142	Terrones de arcilla y partículas deleznable.
ASTM C-131, C-535	Resistencia a la abrasión, prueba de los Ángeles.

La forma, la textura y el tamaño de las partículas del agregado hacen que se requieran diferentes cantidades de agua para una misma masa de agregados del mismo origen. Siendo los agregados de forma esférica, los que menos agua requerirán para dar un grado de trabajabilidad dado a la mezcla de concreto y por otra parte los agregados más irregulares necesitarán mayor cantidad de agua en la pasta.

Los agregados de menor tamaño demandarán una mayor cantidad de agua que los de mayor tamaño. Los agregados más rugosos demandarán una mayor cantidad de agua que los agregados lisos. También es recomendable que los agregados estén en estado saturado y drenados, para mejor control durante la producción.

En contraparte, la adherencia entre la pasta y los agregados es un factor importante en la resistencia final del concreto, sobre todo a flexión, dependerá en cierta medida de la rugosidad de los agregados, ya que los agregados que tengan una superficie áspera proveerán una mayor fricción que los agregados con una superficie más lisa, esto ayuda a la adherencia de las partículas por medios mecánicos. La composición química de los agregados puede ayudar a la adherencia de los agregados, ya que se pueden generar enlaces químicos con la pasta dependiendo de las características químicas de los agregados.

Otra característica que depende de las propiedades físicas de los agregados es la superficie específica, que es el área expuesta que tienen los agregados por volumen. La superficie específica es un indicador de la cantidad de pasta que se necesita; cuando existe una mayor área específica, necesitaremos una mayor cantidad de pasta para poder cubrir la superficie de una masa constante de agregados.

Los agregados por su origen pueden ser naturales o artificiales. Los agregados se dividen por su tamaño en dos: agregado fino (arena) y agregado grueso (grava). La división se hace mediante una criba con una separación de 4.75 mm entre sus divisiones. A esta criba se le conoce como la No. 4. Las partículas que no pasan por esta malla son consideradas como agregado grueso, lo que llega a pasar se le conoce como agregado fino. Los agregados finos tienen un límite arbitrario mínimo que es la malla de 150  $\mu\text{m}$  (llamada del No.100); al material que pasa por la malla de 150  $\mu\text{m}$  se le conoce como polvo.

Para cualquier mezcla, es recomendable que exista una proporción de agregado fino y de agregado grueso que den una composición granulométrica donde exista el mejor acomodo de partículas para que, al ser mezclados, se tenga la menor cantidad de espacios vacíos, ya que estos espacios serán ocupados por la pasta para unir a las diferentes partículas. Existe una gran cantidad de tablas que dan rangos granulométricos para un tamaño máximo de agregado dado. Para cada tamaño máximo de agregado existe una cierta tendencia granulométrica óptima, pero en muchos casos para adecuar el material a esa tendencia resultaría muy costoso, por lo que mejor se utiliza la granulometría natural de los agregados y sólo se modifican las cantidades de agregado grueso o fino por unidad de volumen para adaptarlas lo mejor posible a las curvas granulométricas.

## A.A.C.C. AGUA.

La calidad del agua de mezclado tiene un papel importante en la calidad del concreto, las impurezas del agua pueden causar manchas en la superficie del concreto, propiciar la corrosión del acero de refuerzo, impedir el correcto fraguado de la pasta, o bien, disminuir la resistencia final del concreto. En muchas ocasiones, las aguas que pudieran ser perjudiciales para el concreto endurecido, pueden ser inofensivas y quizá hasta benéficas al emplearlas en el mezclado<sup>9</sup>.

El agua de mezclado no deberá tener cantidades grandes de sustancias orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, no existen normas que prescriban explícitamente la calidad del agua de mezclado. Pero en muchos casos se toma como parámetro el que el agua sea potable, pero que no tengan cantidades altas de sales, cloruros, carbonatos y bicarbonatos alcalinos. Una manera de hacer la prueba de un agua desconocida es hacer cubos con esa agua y compararlos con los que se hacen con un agua destilada o una que se sepa que es buena. Si la diferencia de resistencia no es muy grande (<10%) se puede usar.

<sup>9</sup> Adam M. Neville. Tecnología del concreto. IMCIC. México D F. 1999. 1ª edición

Se recomienda que la cantidad de sólidos disueltos sea menor de 2 000 ppm y que su índice de pH se encuentre entre los valores de 6.0 a 9.0. También se recomienda que la cantidad de cloruros se encuentre por debajo de 500 ppm y la cantidad de  $SO_3$  no exceda de 1 000 ppm.

#### A.A.C.D. ADITIVOS.

Los aditivos aunque no son indispensables para la elaboración de concreto, sirven para darle propiedades y características superiores a las de los concretos normales, añadiéndole beneficios tanto físicos como económicos. Pero los aditivos no funcionan solos, necesitan que los demás componentes de la mezcla tengan una calidad y cantidad adecuada ya que de no ser así el concreto no tendrá las características mínimas necesarias.

Los aditivos pueden ser químicos o minerales y dependiendo de su fabricación se pueden encontrar como polvos o como líquidos. Cuando son polvos se añaden con el cemento en el periodo de mezclado, pero cuando son líquidos se añaden con el agua de mezclado.

Los aditivos pueden tener diferentes funciones como pueden ser acelerar el fraguado, retardar el fraguado, fluidificar el concreto, incluirle una cantidad mayor de aire, reducir la cantidad de agua, darle algún color, sellar, para reducir la cantidad de cemento, bactericidas, etc.

#### A.A.C.D.A. LOS ADITIVOS QUÍMICOS.

Los químicos por su función en el concreto según la norma ASTM C 494-92 se clasifican en:

- > Tipo A Reductores de agua.
- > Tipo B Retardantes.
- > Tipo C Acelerantes.
- > Tipo D Reductores de agua y retardantes.
- > Tipo E Reductores de agua y acelerantes.
- > Tipo F Reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.
- > Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardantes, o superfluidificantes y retardantes.

Cuando se usan estos aditivos hay que tener especial cuidado en su dosificación respecto de las condiciones en las que se vaya a encontrar el concreto ya que muchos de los efectos de los aditivos están en función de la temperatura y la reacción química que tengan tanto con el cemento como con los agregados y el agua. También hay que tener cuidado de no tratar de mezclar dos aditivos sin ensayar su compatibilidad, ya que pueden tener reacciones secundarias contraproducentes. Las medidas de seguridad al manejar estas sustancias deben ser cumplidas estrictamente, a causa de la actividad química de sus componentes. De igual forma, el almacenamiento de estas sustancias debe ser siguiendo todas las indicaciones del fabricante.

Para su correcto uso existen varias normas para su proporcionamiento como la ACI 212 "Guía para el uso de aditivos en el concreto", que contempla los aspectos importantes en el diseño de mezclas de concreto usando los aditivos. Existe un gran interés por la calidad de los aditivos y a continuación se presentan las pruebas para estandarizar los aditivos, en la tabla A.6.

**Tabla A.6 Normas de los aditivos.**

Norma	Tipo de aditivo al que regula
ASTM C-233 ASTM C-260	Aditivos inclusores de aire.
ASTM C-494.92	Aditivos reductores de agua, retardantes y acelerantes.
ASTM C-494.92 ASTM C-1017.92	Aditivos superfluidificantes.

Las características generales de los aditivos depende de su especialización, las características genéricas para las diversas categorías son:

- **Aditivos Acelerantes:** Su función primordial es acelerar el desarrollo temprano de resistencia del concreto, aunque también pueden acelerar coincidentemente el fraguado del concreto. Es recomendable su uso cuando las temperaturas ambientales son bajas (2 a 4°C) y cuando se requiere que el tiempo para la operación de la estructura sea menor, así como formar una capa aislante. No se recomienda su uso en climas calurosos ya que pueden generar un calor de hidratación muy alto que se traduce en grietas por contracción. El acelerante más usado durante mucho tiempo fue un compuesto llamado cloruro de calcio pero por su reactividad con el acero de refuerzo se ha dejado de usar. Ahora se usan, para la misma función, varios compuestos como el nitrito de calcio, el nitrato de sodio, el formaldehído de calcio, el formaldehído de sodio y la trietanolamina (sin sobresalir alguno de ellos).
- **Aditivos Retardantes:** Su función principal es aumentar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento, haciendo también lento el endurecimiento de la pasta, pero sin alterar los productos de la hidratación. En general se usan en climas cálidos, cuando hay tiempos de transporte o colocación muy grandes y cuando se requiere un acabado arquitectónico de agregado expuesto (se pone en la cimbra, no en el concreto). La acción retardante la puede generar derivados de carbohidratos (como el azúcar), sales solubles de zinc, boratos solubles y metanol, principalmente. Se debe cuidar la dosificación ya que la incorrecta dosificación puede impedir el fraguado y endurecimiento de la pasta.
- **Aditivos Reductores de Agua:** Su objetivo es reducir la cantidad de agua requerida para darle al concreto una trabajabilidad dada (usualmente ese valor va del 5% hasta el 15%), con un mínimo de segregación y una buena plasticidad, sin afectar la resistencia a largo plazo. De esta forma se logra reducir la relación agua/cementantes con una trabajabilidad dada, o bien, para una relación dada de agua/cementantes aumentar la trabajabilidad. Su principal utilización es para los concretos bombeados y para los concretos colocados mediante un tubo tremie. Los componentes activos principales funcionan como agentes activos superficiales, esto es, que se concentran en la superficie de unión entre dos fases inmiscibles, alterando las fuerzas fisicoquímicas actuantes. Como efectos colaterales a los referidos, aumentan la superficie específica que se puede hidratar de las partículas de cemento y aumentan la cantidad de agua disponible para la hidratación ya que se adsorben a las partículas con su contenido intrínseco de agua. Los compuestos principales utilizados para este fin son los ácidos lignosulfáticos y los ácidos hidroxilados carboxílicos.
- **Superfluidificantes o Reductores de Agua de Alto Rango:** Tienen el mismo propósito que los anteriores pero tienen una naturaleza diferente y por tanto las propiedades que le dan al concreto en estado fresco y endurecido son diferentes. Los superfluidificantes son polímeros orgánicos sintéticos solubles en agua. Existen dos familias en las que se basan los superfluidificantes, la primera en derivados de la melamina y la segunda en derivados de naftaleno. Los efectos de las moléculas de los superfluidificantes es doblarse sobre las partículas de cemento envolviéndolos con una carga negativa, haciendo que se repelan dando como resultado una defloculación y dispersión de las partículas dando mayor trabajabilidad y la posibilidad de lograr concretos de alta resistencia por una relación baja de agua/cementantes. Su dosificación normal fluctúa de 1 a 20 litros por m<sup>3</sup> y se deben incorporar a la mezcla enseguida que el cemento se encuentre en contacto con el agua. Su único problema radica en que rápidamente se pierden las propiedades de trabajabilidad y por tanto hay que tener mucho cuidado con los tiempos de fraguado, de entrega, colocación y vibrado. Por tal motivo suele añadirsele a pie de obra.
- **Aditivos Especiales:** Existen otros aditivos cuyo uso no ha sido tan extenso pero su efectividad esta comprobada como los aditivos antibacteriales, los aditivos reductores de aire, impermeabilización, etc. Debido a su diversidad no se puede decir que tengan una normatividad que los abarque pero se esta investigando para lograrlo.

## A.A.C.D.B. LOS ADITIVOS MINERALES.

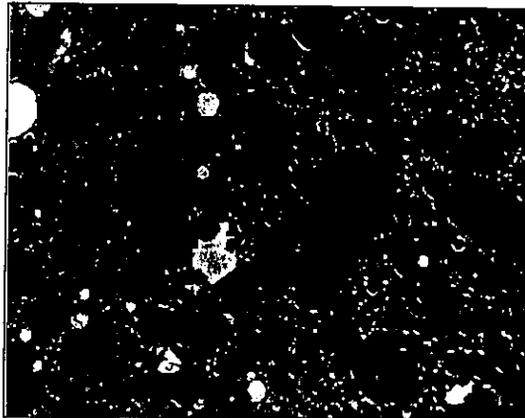
Sirven para modificar las propiedades tanto en estado plástico como en estado endurecido del concreto. En este grupo se encuentran las puzolanas, la microsíllica y los rellenos. El uso de los aditivos minerales genera en la mayoría de los casos un alto calor de hidratación, así como problemas estéticos ya que generalmente ennegrecen el color del concreto. Pero dosificados de manera correcta pueden generar muchos beneficios: como resistencias más altas, mejor fluidez de la mezcla ya que por el tamaño tan pequeño sirven como lubricantes, etc.

Los dos primeros grupos (puzolanas y microsíllicas) tienen propiedades cementantes latentes que únicamente funcionan al existir otros compuestos por lo que no pueden reemplazar totalmente al aglutinante del concreto, de hecho deben trabajar en conjunto. Las puzolanas las define la norma ASTM C 618-94a como un material silíceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante; pero en forma finamente dividida y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio (producido por el cemento Portland al hidratarse) en presencia del agua para formar silicatos de calcio estables, que tienen propiedades cementantes<sup>10</sup>.

Esta misma norma les da una categoría de materiales Clase N. Las puzolanas pueden ser de origen natural o artificial. Los materiales puzolánicos naturales que se emplean son las cenizas volcánicas, las tierras diatomáceas, los horstemos opalinos, las arcillas, las pizarras, las tobas volcánicas y la piedra pómez. Muchas de las puzolanas naturales se les muele previamente a ser usadas y en muchos casos se les tiene que mantener a temperaturas entre 650° C a 1 000° C para activarlas y que tengan propiedades cementantes.

La norma ASTM C 311-94a prescribe la medición de un índice de actividad de resistencia, que nos da actividad pozolánica con ese cemento (se utiliza cal como parámetro ya que el cemento que usemos influye en gran medida del valor que se obtendrá). El tamaño de las partículas para las cenizas volantes está entre 1 µm a 100 µm y su superficie específica entre 250 a 600 m<sup>2</sup>/kg. Teniendo una forma de partícula casi esférica y lisa, que ayuda a mejorar la distribución de esfuerzos y la cantidad de agua de agua demandada por partículas de este tamaño pero con formas más irregulares.

Las proporciones de los dos primeros grupos en una mezcla de concreto suele estar por debajo del 25 por ciento de la masa total de cemento empleada, ya que requieren ciertas cantidades mínimas de hidratos para desarrollar los vínculos con el cemento.

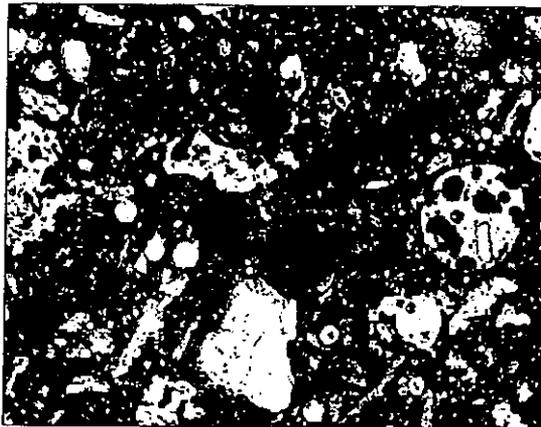


La imagen, obtenida mediante la técnica SEM/X-Ray, pertenece a una ceniza volante clase F. Las dimensiones reales de la imagen son 256 µm por 200 µm. Los colores corresponden a diferentes componentes: silice en rojo, aluminosilicato en azul, Disilicato de aluminato cálcico en verde, C<sub>3</sub>A naranja, anhídridos en color cian y los materiales inertes en blanco.<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Adam M. Neville. *Tecnología del concreto*. IMCIC. México D.F. 1999. 1ª edición

<sup>11</sup> D.P. Bentz, P.E. Stutzman, C.J. Haecker, y S. Remond, *SEM/X-ray imaging of cement-based materials, Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Eds: H.S. Pietersen, J.A. Larbi, y H.H.A. Janssen, Delft University of Technology, pp. 457-466 (1999).

Esta figura pertenece a ceniza volante proveniente de desechos municipales. Las dimensiones reales son de  $512\mu\text{m}$  por  $400\mu\text{m}$ . Los colores corresponden a los diversos componentes, el silice al rojo, aluminosilicato al azul, Disilicato de aluminato cálcico al verde,  $\text{C}_3\text{A}$  al naranja, anhídridos en color cian y los materiales inertes en blanco.<sup>17</sup>



La microsíllica es un producto secundario de la fabricación de silicio y de aleaciones de hierro y silicio a partir de cuarzo de alta pureza y carbón en un horno de arco eléctrico sumergido. El  $\text{SiO}$  gaseoso se oxida y se condensa en la forma de partículas esféricas extremadamente finas, por lo que pueden llenar los espacios entre las partículas de cemento disminuyendo la amplitud del poro del concreto, y además, reaccionan más rápido con el hidróxido de calcio producido al hidratarse el cemento.

Tiene un peso específico promedio de 2.20 (el cemento portland tiene un peso específico de 3.15), el diámetro promedio de las partículas es cercano a  $0.1\mu\text{m}$  en un rango de  $0.03\mu\text{m}$  a  $0.3\mu\text{m}$ . Su superficie específica es del orden de  $20\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ . En la norma ASTM C 1240-93 se especifican los requisitos de este material.

El tercer grupo lo conforman materiales que en general son químicamente inertes o que al hidratarse generen compuestos inertes para la pasta, pero que generan cambios en las propiedades físicas del concreto, tanto en su estado fresco como en el endurecido.

Los rellenos son materiales finamente molidos, que normalmente tienen la misma finura que el cemento Portland y que tienen un efecto positivo en algunas propiedades del concreto como la trabajabilidad, densidad, permeabilidad, capilaridad, sangrado, etc. Se debe tener en cuenta que la granulometría de los rellenos debe ser compatible con el cemento que se use y que su porcentaje en la mezcla sea pequeño. Entre ellos se encuentra la piedra caliza.

## A.A.D. RELACIÓN AGUA/CEMENTANTES

Existen dos principales factores que influyen en la resistencia que obtendrá un concreto, la compactación que tenga y la relación agua/cementantes. El comportamiento de la resistencia respecto a la variación del índice agua/cementantes se asemeja a una parábola invertida. Por lo tanto esta relación debe mantenerse baja para poder alcanzar resistencias altas. Cuando la relación agua/cemento toma un valor menor de 0.38 la hidratación de las partículas no es al 100%.

<sup>17</sup> D.P. Bentz, P.E. Stutzman, C.J. Haecker, y S. Remond, *SEM/X-ray imaging of cement-based materials, Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Eds: H.S. Pietersen, J.A. Larbi, y H.H.A. Janssen, Delft University of Technology, pp. 457-466 (1999).

Esta relación determinará la porosidad de la pasta de cemento endurecida, y por tanto de la resistencia final del concreto, que está en función de:

- la resistencia del mortero.
- la adherencia entre el agregado grueso y el mortero
- la resistencia de las partículas tanto del agregado grueso, como del fino.

Para poder aislar el otro factor que hace variar la resistencia del concreto en el diseño de mezclas se tomará que el concreto tendrá un volumen de vacíos constante, este valor será igual al 1% del volumen total.

La historia de los estudios de la relación agua cemento comenzó en 1896 con René Féret, Jefe de los Laboratorios Centrales de Puentes y Caminos de Francia en ese tiempo, relacionó los volúmenes de agua y cemento con la resistencia del concreto. La regla que encontró es:

$$f'c = K \left( \frac{C}{C+W+A} \right)^2$$

Donde  $f'c$  es la resistencia del concreto, C, W y A son las proporciones volumétricas absolutas de cemento, agua y aire, y K es una constante.

En 1919, Duff Abrams encontró que la resistencia se relacionaba con la cantidad de agua y cementos utilizados en la mezcla, llegando a la expresión:

$$f'c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}}$$

Donde  $f'c$  es la resistencia que obtendrá el concreto,  $K_1$  y  $K_2$  son constantes y W/C la relación agua cemento por volumen.

Actualmente la relación agua/cementantes es el peso del agua, dividido entre el peso del cemento más el peso de los aditivos minerales cementantes. Esta relación tiene valores típicos asociados a resistencias finales, pero estas relaciones varían por el tipo de materiales que se utilicen en la mezcla y del mismo cemento usado. Por lo tanto, los valores típicos nos darán una aproximación general del valor final de la resistencia, pero si queremos saber con mayor precisión se deberán hacer pruebas con los materiales a utilizar, para poder obtener con exactitud la cantidad de vacíos presentes en el concreto.

Para hacer mezclas de prueba, la Portland Cement Association propone una tabla en la que da valores de inicio para encontrar una resistencia de diseño, esta tabla es la tabla A.7. Cuando no se cuenta con datos ni mezclas de prueba, se pueden usar los valores que se encuentran en la tabla A.7 bajo autorización del ingeniero proyectista.

**Tabla A.7. Correspondencia Típica entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión.**

Resistencia a la Compresión a los 28 días [MPa]	Relación Agua/Cemento en peso.	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
42	0.41	-
35	0.48	0.40
28	0.57	0.48
21	0.68	0.59
14	0.82	0.74

### A.A.E. FRAGUADO.

Este término se refiere al cambio de estado plástico a estado endurecido, de la pasta de cemento. El fraguado es causado por la hidratación de algunos de sus materiales, existiendo dos etapas principales en el cambio de estado antes mencionado que dependen del tiempo, una a la que se le denomina fraguado inicial y otra a la que se le llama fraguado final. El tiempo de fraguado está reglamentado por las normas ASTM C-150, la ASTM C-191 y la ASTM C-403.

El fraguado no sólo se ha asociado a la formación de productos cristalinos, también se ha asociado a la formación de ciertas películas que envuelven a los granos de cemento y también se encuentra relacionada con la coagulación conjunta de los componentes de la pasta. De modo externo, la temperatura juega un papel importante en el tiempo de fraguado retardándolo a temperaturas bajas y acelerándolo a temperaturas altas.

Los tiempos de fraguado no deben de ocurrir ni muy pronto, ni muy tarde, ya que este tiempo es un indicador de las reacciones de hidratación que están ocurriendo en la pasta. El tiempo de fraguado está relacionado con la finura del cemento, la relación agua/cemento, los aditivos usados, la cantidad de yeso en el cemento y la temperatura circundante.

Los primeros componentes en reaccionar al hidratarse el cemento son el  $C_3A$  y el  $C_3S$ . Estos se hidratan muy rápido (fraguado relámpago), pero los hidratos formados son más porosos que los formados por los otros compuestos en un tiempo más largo, que se forman dentro de la estructura inicial que hacen los hidratos del  $C_3A$  y del  $C_3S$ .

### A.A.E.A. FRAGUADO FALSO.

Este término se aplica cuando al añadirle agua al cemento y mezclarlos se endurece sin desprender calor, dentro de un periodo corto de tiempo (unos cuantos minutos), pero sin darle un endurecimiento real ya que al volver a mezclar la pasta vuelve a adquirir su plasticidad sin la necesidad de agregarle agua al concreto. Algunas causas del fraguado falso son:

- una deshidratación del yeso por ser mezclado con un clinker demasiado caliente,
- una formación de carbonatos de los álcalis del cemento durante su almacenamiento,
- una activación del  $C_3S$  por aireación en ambientes con humedades relativamente altas.

### A.A.E.B. FRAGUADO INICIAL Y FINAL.

Para determinar estos dos fraguados en la pasta de cemento, se miden los periodos de tiempo que comprenden desde que se mezcla el agua con el cemento, hasta que se cumple que una aguja (un diámetro diferente para cada uno de los fraguados) penetre hasta una cierta distancia en la pasta en la que se quiere determinar el fraguado. Para esta prueba se utiliza el aparato de Vicat.

Para determinar el fraguado inicial se utiliza una aguja con un diámetro de  $1.13 \pm 0.05$  mm, haciéndola penetrar en la mezcla (que se encuentra en un molde especial) a una fuerza constante, hasta que la profundidad de penetración se encuentre alrededor de  $5 \pm 1$  mm. El fraguado inicial se expresa como el tiempo desde que se le añadió agua a la mezcla hasta que sucede el evento antes descrito. La norma ASTM C-150-94 exige un tiempo de 45 minutos como mínimo para el fraguado inicial.

Para determinar el fraguado final se utiliza un procedimiento similar, pero con la diferencia que en esta prueba se usa una aguja con un aditamento metálico hueco de forma tal que deje un borde circular de corte de 5 mm de diámetro colocado a 0.5-mm detrás de la punta de la aguja. El fraguado final ocurre cuando al bajar lentamente la aguja hacia la superficie de la pasta, la penetra hasta una

profundidad de 0.5 mm pero la orilla de corte circular falla al hacer una impresión sobre la superficie de la pasta. En las normas ASTM ya no aparecen los límites en el tiempo de fraguado final. Una buena aproximación es 1.2 veces el tiempo de fraguado inicial más 90 minutos.

Para determinar el fraguado inicial y final de un concreto existe la norma ASTM C-403. Esta prueba está encaminada a establecer la metodología para determinar el tiempo de fraguado de concretos que cuenten con un revenimiento mayor a cero, por medio de la resistencia a la penetración en el mortero que se puede recolectar al hacer pasar concreto fresco por una malla establecida. La prueba se realiza poniendo una porción representativa del mortero en un contenedor, que es almacenado en condiciones ambientales controladas. Para la evaluación de la resistencia a la penetración, la prueba establece el uso de agujas de dimensiones específicas y pruebas de penetración a intervalos regulares de tiempo, de esta manera se puede trazar un comportamiento de desarrollo de resistencia en el tiempo. El punto en el cual la resistencia a la penetración alcanza un valor de 3.5 MPa, es el tiempo de fraguado inicial. Al instante en el que el mortero alcanza una resistencia de 27.6 MPa, se le denomina el tiempo de fraguado final.

## A.A.F. CURADO.

El curado son todas aquellas acciones hechas para mantener al concreto, durante su fase de endurecimiento, en las condiciones propicias para que se genere una correcta hidratación de las partículas del cemento.

El fin de estas acciones es mantener al concreto saturado para que los productos de la hidratación rellenen los espacios que ocupan el agua de mezclado, ya que el único modo de lograr la hidratación máxima es mantener el concreto saturado de agua. De hecho, Powers<sup>13</sup> demostró que cuando la humedad relativa cae por debajo del 80 por ciento la hidratación cae drásticamente. Existen varios aspectos que influyen en la pérdida de humedad del concreto, entre ellos podemos encontrar:

- La humedad relativa del ambiente.
- La velocidad del viento.
- La temperatura del concreto y del ambiente.
- La exposición del concreto a la luz solar.
- Variaciones de temperatura y humedad del ambiente.
- La superficie de concreto expuesta respecto al volumen total.

La importancia de que se realice una buena hidratación del concreto no es sólo por el efecto benéfico que presenta la resistencia final que obtendrá el concreto. También, se ven afectados adversamente otros factores cuando se presenta una hidratación mala, afectando a la durabilidad del concreto, como pueden ser: la resistencia a la abrasión, la permeabilidad del concreto y la contracción plástica. Esto debido a que la hidratación se presenta únicamente en los poros capilares llenos de agua.

Es un problema no sólo de la superficie expuesta, porque en el interior se pueden presentar desecaciones en los poros capilares por la hidratación del cemento (cuando las relaciones agua/cemento son menores de 0.5). Por esta razón se debe promover que exista agua que penetre desde el exterior para impedir la autodesecación y agua que impida que se seque el concreto de la zona exterior (una capa de 30 a 50 mm de espesor aproximadamente). En las zonas internas del concreto no existen pérdidas de agua importante y por tanto los efectos del curado aquí, son prácticamente nulos.

Los diferentes tipos de cementos se ven afectados de diferente manera por los efectos de curado, por ejemplo la resistencia de un concreto hecho con cemento Portland tipo I es afectada de

<sup>13</sup> T. C. Powers. *A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete*. Proc. Highw. Res. Bd, 27, Washington DC, 1974, pp. 178-188

una manera considerable, pero los concretos que contienen ceniza volante o escoria de alto horno son más afectados por un curado inadecuado.

### **A.A.F.A. MÉTODOS DE CURADO.**

Existen dos principales categorías, el curado húmedo y el curado con membrana. Estas dos categorías se pueden dividir muchas veces, debido a que dependen de la posición del elemento, el tamaño, condiciones del medio ambiente, disponibilidad del agua, etc. En el primero el principio básico es mantener la superficie del concreto en contacto con el agua durante un periodo de tiempo especificado, iniciándose el proceso cuando la superficie del concreto ya pueda aplicársele el curado sin dañarla. En esta opción se pueden usar tres técnicas principales el rocío, la inundación o el mantener el concreto en sustancias saturadas de agua que periódicamente se mojan para mantenerlas saturadas (aserrín, paja, arena, etc.).

El agua que se recomienda usar para el curado debe tener las mismas características del agua de mezclado, pero se da un énfasis especial en que no contenga sustancias que afecten a los concretos endurecidos. También, se recomienda tener un suministro continuo de agua, ya que es más eficiente que un suministro intermitente. Es importante que el gradiente de temperatura entre el agua y el concreto sea bajo para evitar un choque térmico; la norma ACI 318-92 estipula que el gradiente máximo no deberá sobrepasar 11°C.

La segunda tiene el principio de no dejar salir agua pero tampoco se deja entrar agua, mediante láminas de polietileno o membranas de resinas de hidrocarburos sintéticos. Las características que deben tener las láminas están estipuladas en la norma ASTM C-171-92 y las características de las membranas están en la norma ASTM C-309-93.

La colocación de las membranas debe hacerse rápido e inmediatamente después que ya no exista agua por sangrado, pero sin dejar secar al concreto, debido a que los químicos pueden penetrar en el concreto e impedir la hidratación. Las membranas no deben tener rasgaduras o discontinuidades que permitan la evaporación de agua.

### **A.B. CONCRETOS AUTONIVELANTES Y SUPERFLUIDOS.**

Se denomina de esta forma a los concretos que por sus características presentan la propiedad de tener una fluidez muy alta y por tanto su comportamiento se aproxima más a un líquido, que al de un sólido. La idea en que se basan consiste en tener una mezcla que adopte la forma del contenedor en el que se va a depositar y que no requiera de energía externa para poder hacerlo.

Este tipo de concretos buscaban tener una fluidez muy grande para poder llenar completamente los miembros a los que pertenecerían y así dar una mayor eficiencia en la obra. El problema con este tipo de concretos y su uso era el no tener de una tecnología adecuada de aditivos químicos que permitieran una fluidez grande pero sin un alto contenido de agua, que reduce la viscosidad y cohesión de la mezcla.

El principal problema de los concretos autonivelantes y superfluidos es una relación agua/cementantes muy alta que nos ofrece los problemas de sangrado, segregación y mala calidad en el producto final. Por estos motivos aunque eran una buena idea ya que se presentaban ahorros por menor cantidad de trabajo para colocar la mezcla, había otros gastos que los hacían imprácticos.

El uso de estos concretos fue muy limitado debido a que no aseguraban un producto de calidad. Las principales aplicaciones tuvieron fueron en rellenos y pisos que no requirieran soportar esfuerzos importantes.

## CAPÍTULO I

# CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

Durante muchos años la resistencia ha sido el principal factor al diseñar mezclas de concreto hidráulico, pero ahora también se toman en cuenta su desempeño en obra y la durabilidad como factores para el diseño. Los concretos que reciben el nombre de concretos de alto comportamiento, son concretos que tienen la característica de tener un enfoque diferente al que se le daba al concreto convencional. Estos concretos se diseñan con el fin de lograr ventajas económicas, facilidad de su uso en el sitio de construcción, mayor durabilidad, mayor resistencia a la compresión, mejor resistencia a la corrosión o al desgaste, menor peso, etcétera. En resumen son concretos que tienen un desempeño superior a los concretos convencionales.

El *American Concrete Institute* define a los concretos de alto desempeño como "Concreto que tiene las propiedades superiores y cuya uniformidad que no puede ser obtenida rutinariamente usando los constituyentes tradicionales con el mezclado, colocación y curado comunes".

El impacto que tienen y tendrán en un futuro cercano este tipo de concretos es muy importante, dado que no se limitan a mejorar una característica. Por el contrario, la filosofía es mejorar la calidad general del concreto para facilitar su manejo en estado fresco, capitalizar posibles ahorros a futuro y tener una mayor confiabilidad en las estructuras que los empleen ya que presentan propiedades mecánicas mejoradas a cualquier edad, proveyendo de una menor permeabilidad y una mayor resistencia a impactos y abrasiones que a la larga incrementan la durabilidad. Dentro de esta gran gama de concretos se encuentran los concretos autocompactables.

Los concretos autocompactables se basan en el principio de poder lograr una correcta compactación, sin la necesidad de vibrar para lograr una buena consolidación, factores cruciales para su desempeño y durabilidad. Por estas características son especialmente útiles en lugares de difícil acceso, como serían zonas altamente reforzadas o formas complicadas. Al poder garantizar una buena consolidación en estos lugares, se puede lograr un concreto de buena calidad en todos los elementos donde se use.

Los concretos normales presentan ciertas características que no facilitan su colocación, terminado, homogeneidad, y otros factores en elementos como los descritos en el párrafo anterior. Para poder tener una adecuada compactación se deben usar medios mecánicos que logren que el concreto se introduzca correctamente en los elementos en los que se quiere usar. En muchas ocasiones cuando se usa vibrador para lograr lo antes citado se presentan muchos problemas, ya que el vibrado ayuda a sacar las burbujas de aire atrapado cuando se usa correctamente, pero si se usa de más, se puede lograr una segregación de los agregados de la lechada quedando puntos de menor resistencia y zonas de falla. Si no se vibra el tiempo suficiente no se deja escapar el aire atrapado, que dentro de la matriz de concreto no proporciona resistencia, generándose concentraciones de esfuerzos a sus alrededores. Ya que no se puede garantizar la misma consolidación en todo el miembro, no se puede lograr una apariencia estética igual en todo el miembro o bien en ocasiones se tendrán que resanar las superficies en las que no penetró correctamente el concreto dejando huecos que afectan considerablemente su apariencia visual.

El primer precedente que se tuvo de los concretos autocompactables fueron los concretos autonivelables. Los concretos autonivelables, al ser colocados tendían a fluir hasta adquirir un nivel sin necesidad de mayores esfuerzos para alcanzarlo. La problemática principal presentada por los concretos autonivelantes es que se lograban utilizando altos contenidos de agua (relaciones agua/cemento mayores a 0.70) que no permitían una resistencia alta a la compresión y reducían la durabilidad del concreto.

Los concretos con superfluidizante significaron un gran adelanto tecnológico, ya que éstos podían reducir la relación agua/cementantes, y proveían de condiciones buenas para su manejo en estado fresco, que se reflejaban en mayores resistencias a la compresión y mejor calidad final de las estructuras. Pero en muchas ocasiones, también requerían de vibrado y por lo tanto se presentaban los mismos problemas que con los concretos normales, sólo que en menor proporción.

El concepto de concreto autocompactable surgió en Japón, en la Universidad de Tokio por Hajime Okamura en 1986 y su desarrollo se dio por primera vez en Japón por Kazumasa Ozawa en 1988<sup>1</sup>. Con el fin de crear un concreto que no requiriera consolidación *in situ* para mejorar la calidad del concreto y las estructuras hechas con este material. La perspectiva con la que se diseñaron los concretos autocompactables fue crear una mezcla con una capacidad de deformación alta y sin problemas de segregación de los agregados, para reducir al máximo los defectos causados por factor humano, ya sea en la colocación o durante la consolidación.

Todo esto no sería posible sin los avances en la Química que se han logrado en recientes años. De hecho, se han logrado hacer agentes químicos llamados Reductores de Agua de Alto Rango los cuales permiten, al ser usados con propiedad, una gran trabajabilidad sin tener problemas de sangrado o segregación.

Durante los últimos 25 años se han seguido realizando investigaciones enfocadas a este tipo de concretos y su uso se ha extendido a todo el mundo. Debido a su gran cantidad de aplicaciones y características propias, se puede pensar que a futuro será un material esencial para desarrollar la infraestructura que necesitaremos en los siguientes años.

## I.I. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

Las principales características de estos concretos son su gran capacidad de consolidación, su alta fluidez y su alta resistencia a la segregación. Los concretos autocompactables tienen muchos beneficios que propician su uso en cualquier elemento que se construya y no lo limita a un sólo tipo de aplicación. Los concretos autocompactables se constituyen de una diversidad de materiales, pero principalmente usan los mismos que los concretos normales (grava, arena, cemento y agua). La diferencia radica en las proporciones usadas de cada uno de éstos y el uso de mejores aditivos químicos y físicos.

"El concreto de alto desempeño y otros materiales basados en el cemento son elementos de varios compuestos con propiedades físicas que están influenciadas fuertemente por las fracciones volumétricas y las formas de los componentes individuales"<sup>2</sup>.

Dado que son concretos que tienen mayor facilidad para consolidarse, mejoran la homogeneidad de la estructura al eliminar zonas con huecos indeseables, que no aportan resistencia y propician una concentración de esfuerzos alrededor de ellos y por tanto una resistencia menor del miembro.

Estos factores se ven típicamente en miembros delgados o altamente reforzados donde se dificulta el uso de vibradores y por tanto alcanzar una calidad razonable. O bien, dada su gran versatilidad se pueden usar para reacondicionar estructuras dañadas dada su gran fluidez y capacidad para introducirse con gran eficiencia a lugares de difícil acceso. Con esto se puede esperar una mayor vida útil de las estructuras que los contengan, dando así ahorros a largo plazo.

<sup>1</sup> Estos dos autores son miembros del ACI y profesores del Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad de Tokio, Tokio, Japón. Durante los últimos años se han dedicado al estudio de los concretos autocompactables y a los concretos de alto desempeño, publicando una gran cantidad de documentos a este respecto

<sup>2</sup> Bentz et al. *ACI: SP 159-18; High-Performance Concrete: The role of the Cementitious Materials Modeling Laboratory*. Estados Unidos de Norteamérica.

Las mezclas de concretos autocompactables tienen menores contenidos de agregado grueso y mayores contenidos de finos que la mayoría de los concretos normales, con una granulometría óptima de los agregados. También tienen una alta dosificación de aditivos Reductores de Agua de Alto Rango. Es de especial importancia la correcta proporción de cada uno de los elementos en la mezcla, ya que las propiedades de consolidación del conjunto dependen de las propiedades individuales de los elementos.

Para poder conseguir su alta fluidez y mantener relaciones agua/cementantes relativamente pequeñas se requiere de materiales más eficientes que mejoren las características de los concretos normales. Se pueden dividir en dos grupos principales los materiales antes citados: los que sirven como ayuda cementante y los aditivos que sirven para modificar la viscosidad y tiempos de fraguado. Dentro de los cementantes están las escorias de alto horno, ceniza volante y el humo de silice, principalmente. Por parte de los aditivos tenemos condensados de melaminaformaldehído sulfonado, condensado de naftalenoformaldehído sulfonado, lignosulfonatos modificados y éteres de carbohidrato y ácidosulfónicos.

Los concretos autocompactables evitan los principales problemas generados por la vibración que requieren los concretos normales como serían: ruidos excesivos, suspensión de labores en zonas residenciales por las noches, daños a la salud de los obreros, mayor mano de obra para la colocación, oquedades que se presentan en las superficies cimbradas con material impermeable, pérdidas de tiempo en la colocación y resanes por malos acabados, los gastos relacionados con la adquisición de la maquinaria y su mantenimiento. Dando así mayor uniformidad estética, mayor eficiencia a la obra y reduciendo el impacto ambiental a la zona de obra por ruidos.

A los concretos autocompactables no se les puede comparar usando los métodos tradicionales para los concretos normales, porque en muchos casos las pruebas fueron diseñadas para concretos con menor fluidez y por tanto estas pruebas no dan un buen parámetro de comparación. Por estas razones se han establecido pruebas especiales para poder evaluar las características especiales como fluidez, autocompactación, porcentaje de consolidación, de estos concretos.

Las desventajas que presentan estos concretos principalmente son dos. Su inversión inicial puede representar un problema considerable, debido a que utiliza muchos químicos costosos para poder lograr las características necesarias de la autocompactación. Otro problema es el contenido de aire atrapado ya que requiere del uso de estabilizadores especiales y agentes especiales inclusores de aire para poder asegurar tener el contenido deseado en la mezcla de concreto de aire, en nuestro país normalmente no se requiere un contenido elevado de aire y por tanto esta problemática no es de mayor importancia para su implementación nacional. Por otra parte, debido a su reciente aparición, los diseños y ajustes de mezclas son un poco más complicados.

### **1.1.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.**

Los concretos autocompactables tienen características de plasticidad y de fluidez diferentes de los concretos normales ya que no requieren de energía extra, en forma de vibrado, para poder tener una buena compactación. Los concretos autocompactables no tienen que vencer el esfuerzo cortante inicial que se presenta en una mezcla de concreto normal, dicha fuerza cortante no permite una fluidez intrínseca de la mezcla, para poder tener un nivel aceptable de compactación por gravedad.

A los concretos autocompactables se les incorpora una cantidad mayor de superplastificantes o reductores de agua de alto rango comparando con los concretos normales, para poder mantener la fluidez durante un tiempo considerable, sin tener ningún efecto indeseable cuando se endurezca.

El uso de superplastificantes en conjunción con grandes concentraciones de materiales menores a 90  $\mu\text{m}$  de diámetro pueden controlar eficientemente la viscosidad de la mezcla. En los casos que se requiera un contenido de polvos reducido, se puede disminuir la cantidad de polvos si se usa un controlador de viscosidad.

Un parámetro importante a considerar es la relación que existe entre la fluidez y la segregación, cuya importancia se ha expuesto en estudios hechos por una gran diversidad de investigadores internacionales<sup>3</sup>, ya que al aumentar excesivamente la resistencia a la segregación se perderá fluidez en la mezcla. Pero si la mezcla es demasiado fluida se pueden tener problemas de segregación. En las mezclas se debe encontrar un punto donde coexistan ambas características en un estado satisfactorio.

Debido a la importancia que para obtener concretos autocompactables la fluidez y la resistencia a la segregación son parámetros que se deben medir y controlar. La fluidez en las mezclas de concretos autocompactables de revenimientos mayores a 190 mm, por lo que se transforma un poco esta prueba, a una donde se mide el esparcimiento del concreto en lugar de su asentamiento. La prueba llamada "*Slump Flow*" (que se pudiera traducir como flujo de revenimiento), da como resultados diámetros del orden de 660 a 720 mm, y sirve para comparar fluidez, consistencia y cohesividad. Las características de esta prueba serán descritas ampliamente en otro apartado. Para medir la segregación también se han desarrollado pruebas para evaluar el desempeño de los concretos, dichas pruebas se expondrán ampliamente en capítulos posteriores.

Un beneficio que tienen los concretos autocompactables es su alta trabajabilidad que, en obra, no se traduce sólo en una cantidad menor de obreros al colocarlo. De hecho, se puede prever un incremento en la eficiencia de los obreros en colados grandes ya que es menor el trabajo que requiere por unidad cúbica este tipo de concreto para quedar terminado, respecto a concretos normales.

Debido a que se comporta casi como un líquido un concreto autocompactable, se presentarán incrementos de presión considerables al colocar concretos autocompactables que se deberán tomar en cuenta al calcular las estructuras que conformen la cimbra. De igual forma, se debe tener presente la posibilidad de la aparición de bolsas de aire, por lo que se deberá dejar algunos espacios donde se asegure que pueda escapar éste.

Los concretos autocompactables requieren que al realizar las pruebas preliminares de las mezclas, se debe tener especial cuidado en que la mezcla debe mantener la misma trabajabilidad durante el tiempo necesario para su colocación, para no tener que agregarle retardantes químicos que elevarían aún más el costo de este concreto ya que no se cumpliría con las características que hacen diferentes a los concretos autocompactables.

Los contenidos de aire para los concretos autocompactables pueden variar y ajustarse al valor que se requiera, sin embargo se han encontrado ciertas dificultades al mezclar los aditivos inclusores de aire y los aditivos superfluidificantes que requieren de una observancia importante para poder lograr los resultados deseados. Los valores típicos para concretos autocompactables sin aire incluido se encuentran cercanos al 1.5% y para los concretos autocompactables con aire incluido están en el rango de 4 a 6%.

Los concretos autocompactables normalmente requieren de materiales de mayor calidad y en algunos casos sustancias particulares. Cuando se requiere una resistencia baja, el uso de humo de sílice o ceniza volante no es necesario a menos que se requiera incrementar la fluidez de la mezcla ya que estas diminutas partículas actúan favoreciendo el movimiento de los componentes. Las partículas de estos materiales son semiesféricas y aproximadamente tienen un tamaño 100 veces menor que las partículas de cemento y al llenar los huecos en la pasta mejoran considerablemente la resistencia y la durabilidad, por su facilidad para formar uniones con los productos de la hidratación del cemento, formando compuestos más densos y por tanto una matriz mucho más compacta, que resulta en una mayor resistencia y llenando los huecos que quedarían entre partículas de cemento. Cuando se

<sup>3</sup> Okamura, Ozawa, Nagamoto, Nagataki, Fujiwara, König, Grimm, Schmelzer, Jost, Bentz, Oloukun, Cadoret, Richard, etc. Todos ellos reconocidos investigadores de prestigias instituciones.

requieren resistencias a la compresión altas (mayores de 70 MPa), incrementar la dureza o mejorar la trabajabilidad de la mezcla, es casi indispensable su uso.

## I.I.II. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO.

En general las propiedades de los concretos autocompactables no cambian respecto a las encontradas en los concretos normales con la misma relación agua/cemento. Una de las principales ventajas que ofrecen los concretos autocompactables respecto a los concretos normales es su mayor homogeneidad en cualquier dirección que se le examine y por tanto un mejor desempeño.

La resistencia a la compresión en el largo plazo es mayor para los concretos autocompactables que para concretos normales con la misma relación agua/cementantes. De igual forma se presenta un incremento en el módulo elástico, pero este incremento se presenta en menor proporción que el incremento de la resistencia a la compresión.<sup>4</sup>

El uso de agentes retardantes en los aditivos usados para conseguir los concretos autocompactables puede generar una resistencia menor a edades tempranas. Por lo tanto debe estudiarse el tiempo mínimo para obtener la resistencia deseada y también se deben tener precauciones por estos motivos en los procesos constructivos posteriores al colado de cualquier elemento que utilice concretos autocompactables.

Aunque el retardo siempre va a existir, dependerá de la dosificación de los aditivos. "Pero esto no es mayor problema ya que se han logrado tiempos de fraguado de 20 horas aproximadamente, y se han podido reducir hasta obtener la misma resistencia a 14 horas que la proporcionada por concretos normales."<sup>5</sup>

La resistencia a la tensión del concreto ( $f_t$ ), está en el rango del 8 al 10% de la resistencia a la compresión en la mayoría de los casos. Para los concretos autocompactables estos porcentajes son similares a los de concretos normales de la misma resistencia a la compresión. Dentro de los estudios que se le han hecho a este tipo de concretos, Oluokun propuso una fórmula que es la que más se acerca a los resultados experimentales y esta dada por la expresión siguiente.<sup>6</sup>

$$f_t = 0.295 f_c^{0.69}$$

"El efecto en la resistencia que puede producir el curado en concretos autocompactables es menor que el producido en concretos normales"<sup>7</sup>. Estas afirmaciones están basadas en experimentos y experiencia de dos investigadores coreanos, Jin-Kuen Kim y Sang-Hun Han, pertenecientes al Korea Advanced Institute of Science and Technology. Estos mismos investigadores encontraron que el "Creep" de los concretos autocompactables es similar al presentado por los concretos normales a edades grandes, pero en edades cortas presentan un mayor "Creep" que los concretos normales. Esto lo explican debido a que un mayor contenido de aglutinante y un menor volumen de agregado grueso; ambos factores incrementan el "Creep" de un concreto. De igual forma determinaron que la contracción por secado de los concretos autocompactables es mayor que el de los concretos normales, en proporciones hasta de 30 a 50%. Esto por tener altos contenidos de reductores de agua, más mortero y menos agregado grueso que los concretos normales.

<sup>4</sup> Kim y Han. *ACI SP172-34 Mechanical Properties of Self Flowing Concrete*. Corea

<sup>5</sup> Philippe Jost, *Product manager, Concrete Production, Sika Corporation (USA)*.

<sup>6</sup> Kim y Han. *ACI SP172-34 Mechanical Properties of Self Flowing Concrete*. Corea

<sup>7</sup> Kim y Han. *ACI SP172-34 Mechanical Properties of Self Flowing Concrete*. Corea

### 1.1.III. MATERIALES PARA SU ELABORACIÓN.

Para los concretos autocompactables se utilizan como materiales principales los usados en los concretos normales: Agregado grueso, agregado fino (sean éstos triturados o no triturados), agua y cemento Portland. Los concretos autocompactables además requieren incorporar varios aditivos minerales y químicos, para lograr una mejor trabajabilidad.

Dentro de los aditivos químicos están los superplastificantes, los reductores de agua de alto rango y los controladores de viscosidad. Entre los agentes químicos más usados como plastificantes y reductores de agua están el ácido sulfúrico naftaleno, el ácido policarboxílico tipo polímero, los condensados de naftalenoformaldehído sulfonado, que pueden llegar a reducir la demanda de agua hasta en un 45%. Los agentes químicos usados como controladores de viscosidad son polímeros acrílicos o de celulosa solubles al agua, principalmente.

Los aditivos minerales se usan para aumentar la lubricación interna de la pasta (por las características esféricas de las partículas) y mejorar la resistencia a la segregación de la mezcla al tener altos contenidos de polvos, sin aumentar el calor de hidratación que generaría hacerlo con grandes cantidades de cemento. Si se usa un aditivo controlador de la viscosidad no es necesario incorporar grandes volúmenes de polvos. Los aditivos minerales normalmente usados en los concretos autocompactables son escoria de alto horno, ceniza volante, polvo de caliza y microsilice.

### 1.1.IV. METODOLOGÍA PARA SU OBTENCIÓN.

Existen varios métodos para desarrollar los concretos autocompactables que cuentan con diferentes enfoques para este efecto. Aquí se presentan sucintamente tres metodologías, que pertenecen a reconocidos investigadores de esta nueva tecnología. En la bibliografía de este trabajo se pueden encontrar una gran diversidad de metodologías que en gran medida se encuentran relacionadas con las que se expondrán aquí.

Dentro de los métodos que existen, está el de Takeshita et al. En este método al realizar las mezclas de prueba para un concreto autocompactable se evalúa la relación existente entre la viscosidad y la cantidad de superplastificante. La cantidad de superplastificante mejora la propiedad de autocompactación. Pero, el concreto autocompactable no sólo depende de la dosificación de aditivos, sino que es todo un sistema compuesto por todos los elementos del concreto. Si no existen buenas características reológicas de la pasta o de los agregados no se logrará una buena autocompactación, de hecho habrá un punto en el que por más plastificante que se añada a una mezcla no se mejora más la autocompactación, al punto donde no se puede lograr mayor autocompactación se le llama punto de máxima autocompactación. Por estas razones este método no es muy útil.

Otro método es el empleado por Okamura y Ozawa para conseguir concretos autocompactables. Este método consiste en disminuir el porcentaje de agregado en la mezcla, reduciendo la cantidad de energía perdida al tener colisiones con obstáculos y entre las mismas partículas de los agregados. "Es conveniente en este método utilizar una relación agua/polvos volumétrica aproximada a 1.0 para proveer de una viscosidad adecuada a la pasta y así evitar la segregación y garantizar la compactación"<sup>8</sup>. Este método normalmente converge en mezclas con altos contenidos de cemento, lo que obliga a cambiar parte del cemento por aditivos minerales para evitar los problemas generados en el concreto por altos contenidos de cemento. Los aditivos minerales pueden ser escoria de alto horno, ceniza volante, polvo de caliza y microsilica. El uso de superplastificantes es requerido en este método, pero sin el enfoque del método anterior.

<sup>8</sup> Okamura y Ozawa. *SP 159-2 Self compactable high performance Concrete in Japan* Japón

El último método que se tratará en este documento es el de Shindo y Matsuoka que consiste en añadir a la mezcla un agente que inhiba la segregación. Este método requiere que exista una mezcla muy fluida que cuente con una correcta dosificación de los elementos constitutivos del concreto, en especial de los agregados.

Independientemente del método a utilizar, se debe dar una adecuada viscosidad y deformabilidad a la pasta. Lo ideal es tener al mismo tiempo una viscosidad muy alta y una alta deformabilidad de la pasta. La pasta debe ser lo suficientemente viscosa para evitar el asentamiento del agregado grueso y así poder mantener uniformidad en el concreto. Otro aspecto que cobra importancia en la viscosidad de la pasta es que puede inhibir el contacto directo entre las partículas de grandes tamaños del agregado y así reducir los esfuerzos que se presentan entre estas partículas.

Me parece muy importante mencionar que se trata de un concreto que tiene las propiedades tanto de un líquido como las de un sólido, que habrá que tomar en cuenta para cualquier proceso constructivo o de preparación que involucren a estos concretos. Además, se debe garantizar la autocompactación y la trabajabilidad adecuada del concreto en estado fresco sin comprometer o disminuir otras propiedades igualmente importantes.

## **I.II. SITUACIÓN ACTUAL EN EL MUNDO Y EN MÉXICO.**

La cantidad de concreto autocompactable que se ha usado en todo el mundo es reativamente pequeña debido a su reciente aparición. Además, contando con una gran desventaja para su uso en los países en desarrollo: poca capacidad de liquidez financiera para hacer inversiones iniciales mayores para proyectos que a largo plazo serían más económicos que los realizados con concretos normales.

Debido a sus grandes aplicaciones y el desarrollo de nuevos productos y tecnologías se espera que los costos de los concretos autocompactables se reduzcan. Esto sólo será posible si llegan a tener una aceptación buena, que propicie una mayor investigación enfocada en los materiales y características de estos concretos.

A continuación se encuentra una pequeña recopilación, de algunas experiencias importantes obtenidas en países que se encuentran a la vanguardia en la producción de concretos autocompactables, que pudieran ilustrar sus posibles aplicaciones.

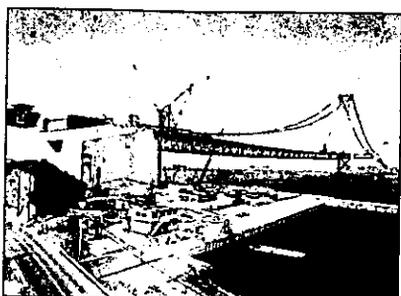
### **I.II.I. EXPERIENCIAS EN JAPÓN.**

Japón es el país que ha tenido mayor experiencia con estos concretos, no sólo porque ahí se crearon, sino porque se han desarrollado nuevas tecnologías que han generado grandes reducciones en el costo de elaboración de los concretos autocompactables.

De hecho, se ha llegado a tener un uso casi tan común como el de los concretos normales. Actualmente la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles y el Instituto de Arquitectura de Japón se encuentran trabajando en la estandarización de los concretos autocompactables.

En este país los concretos autocompactables se han usado en muchas obras de diferentes áreas de la Ingeniería Civil como: edificaciones de concreto, puentes, puertos, rascacielos, estadios con formas complejas, tanques para almacenar gas licuado, pisos industriales e incluso para alcantarillas.

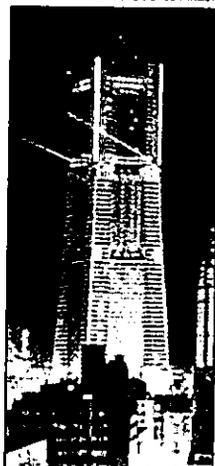
Como ejemplo del uso de los concretos autocompactables en obras civiles tenemos varias obras donde se implementaron con éxito (la construcción del puente Akashi Kaikyo la torre Landmark etc ) y que se expondrán a continuación



Anclaje A4 del Puente Akashi-Kaikyo



Vista del puente Akashi Kaikyo



Torre Landmark de noche

El puente suspendido de **Akashi Kaikyo** fue construido para cruzar los cuatro kilómetros del estrecho de Akashi, uniendo a las islas japonesas de Honshu y Awajishima. Su longitud total es de 3910 m, en sus tres claros, teniendo un claro máximo de 1990 m. Su construcción comenzó en 1988 y se completó en 1998, siendo el puente colgante más grande del mundo.

El sistema constructivo utilizado para que los cimientos de las torres principales del puente estuvieran en la posición correcta y fuera seguro trabajar en ellos, fue necesario sumergir un tubo de acero gigante de 80

m de diámetro y 70 metros de altura, en el lecho marino que se encontraba a 60 metros. Los cimientos contienen una gran cantidad de acero puesto que se diseñó el puente para soportar temblores de 8.5 grados Richter de magnitud y vientos de hasta 80 metros por segundo. Dadas estas condiciones y una muy apretada agenda de trabajo, el uso de concretos autocompactables fue muy útil para lograr a tiempo la construcción de esta gran estructura vial que unirá a las ciudades de Kobe y Naruto, Japón.

En la construcción de los anclajes de este puente se obtuvieron varios beneficios al usar concretos autocompactables

en lugar de concretos normales. A pesar de usar una mezcla con un agregado máximo de 40 mm y depositar, por medio de bombeo, el concreto en secciones grandes desde la parte más alta de la sección (5 m de ancho, por 5 m de largo, por 3 m de elevación) sin presentarse problemas de compactación o de segregación de la mezcla. De esta manera se consiguió reducir el tiempo de ejecución de la obra en un 20% (de 2.5 años a 2 años) y también se disminuyó la cantidad de obreros en el sitio.<sup>9</sup>

A pesar de este gran beneficio, también existieron factores negativos en su implementación. "Se reportó que el costo de los materiales para el concreto autocompactable usado en uno de los anclajes del puente Akashi Kaikyo (250,000 m<sup>3</sup>), fue 10% mayor que el costo de un concreto normal".<sup>10</sup>

Otro ejemplo del correcto uso de concretos autocompactables es palpable en el edificio más grande de Japón, **La torre Landmark** construida cerca del puerto de Yokohama en la bahía de Tokio. Este edificio cuenta con una altura de 296 metros. Es una edificación que alberga un hotel y oficinas en 70 pisos sobre el nivel de calle, cuatro niveles subterráneos y un penthouse. Desde los cimientos hasta el noveno piso es una estructura de concreto reforzado y la parte superior, se compone de estructuras de acero. El área del edificio es de 23 208 m<sup>2</sup> y el área total de todos los pisos del

<sup>9</sup> Masahiro Ouchi, *International Workshop on Self-Compacting Concrete. History of development and applications of Self-Compacting Concrete in Japan*. Pp 1, Japón, Marzo 1999

<sup>10</sup> Ahmad, Russel y Zia. *ACI SP-159 High-Performance Concrete, Summary of the Workshop*. Pp 1-22, Noviembre 1994

edificio es de 392 885 m<sup>2</sup> El peso total de la Torre Landmark se estima en 4 315 Mega Newtons <sup>11</sup>

Las columnas de la zona de concreto reforzado eran construidas al llenar estructuras de acero huecas con concreto. Estas columnas tienen una altura cercana a 40 m. Se optó por rellenar las columnas con concretos autocompactables desde su base para poder realizar esta acción sin tener problemas de huecos. Las columnas cuentan con diafragmas para evitar sobrepresiones pero propician la formación de huecos y discontinuidades. Las columnas tienen dos diafragmas, cada uno en las uniones de vigas y columnas. Los diafragmas tienen un hueco central de forma circular de 18 cm de diámetro y cuatro agujeros de 3 cm de diámetro en las esquinas.

Las 66 columnas construidas por este medio se llenaron con éxito por medio de bombeo sin la necesidad de vibrado externo. Durante la construcción, usando una cámara de video, se comprobó que el concreto aparecía en los cinco agujeros de los diafragmas al mismo tiempo. Para poder asegurar la calidad de las columnas, en varias de ellas se añadieron tramos de 6 metros en la parte terminal para poder evaluar sus características finales del concreto. En estos prototipos no se observaron huecos y el porcentaje de área de burbujas era relativamente pequeño. El asentamiento de las columnas fue mínimo, de 2 a 4 mm en las columnas de casi 40 metros. El concreto empleado en las columnas tenía una resistencia media a 28 días fue de 44.2 MPa.

De una manera igualmente exitosa se han usado los concretos autocompactables para la elaboración de tanques de almacenamiento de desperdicios tóxicos, en la fabricación de elementos prefabricados, en la recuperación y modificación de puentes existentes donde el vibrado es prácticamente imposible de lograr.

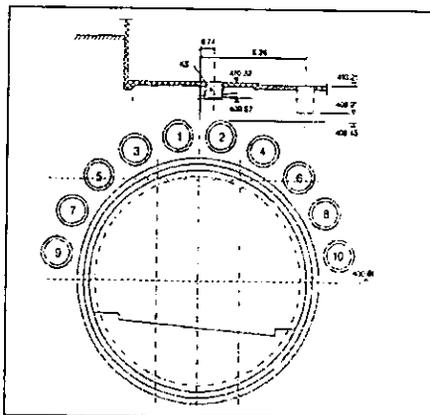
## I.II.II EXPERIENCIAS EN SUIZA.

En este país se han hecho varias obras para incrementar y mejorar la infraestructura existente, utilizando los concretos autocompactables. Aquí se presentan dos ejemplos de estas prácticas.

El primer ejemplo corresponde al uso de concretos autocompactables en el Meinhard Square en Zurich. Conforme al proyecto "Bahn 2000" se construye un túnel de 9.4 kilómetros de longitud, que unirá a las ciudades de Zurich y Thalwil. El túnel cuenta con dos carriles y un diámetro interior cercano a los 6.5 metros.

La entrada del túnel se construye apenas debajo de las cimentaciones de los edificios (2 a 3 metros), por esta razón se tomaron medidas pertinentes para apuntalar el terreno. Con este fin se construye una pantalla de tubos por encima del túnel. La pantalla es un conjunto de 10 líneas de tubos de concreto, de 1.25 metros de diámetro interno y 15 centímetros de ancho de pared. Esta pantalla es de vital importancia para el proyecto ya que la alineación del túnel principal depende de la eficiencia de este método, por lo que tiene niveles muy altos de especificaciones para asegurar la seguridad tanto del túnel como de los edificios que yacen sobre él.

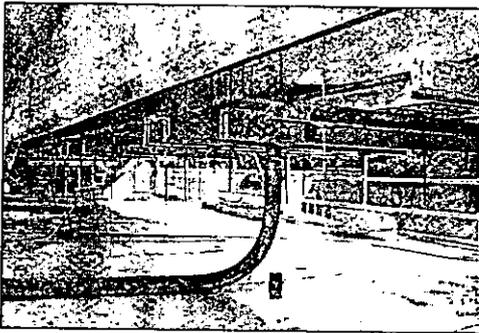
La tubería que sirve de guía para la pantalla es empujada al subsuelo, mediante gatos hidráulicos, a lo largo de distancias de 138 a 150



<sup>11</sup> Todos estos datos referentes a la Torre Landmark se extrajeron de: Hayawaka, Matsuoka y Yokota. *ACI, SP 154-20, Application of Superworkable Concrete in the Construction of 70-Story Building in Japan.*

metros En el inicio de la tubería se insertan soluciones bentoníticas para lubricarla y darle mayor sustento al suelo circundante, paso siguiente se retira el material que quedaria dentro de la tubería utilizando una banda transportadora Después se refuerzan las tuberías con canastas de acero prefabricadas y concreto colado *in situ*. Este concreto utilizado es un concreto autocompactable, con una resistencia de 35 MPa, que debe rellenar casi horizontalmente 50 m de tubería altamente reforzada (50 m fue la distancia óptima para una sección), utilizando unicamente la energía suministrada por la bomba de concreto (el proceso se realiza con presiones normales de bombeo) Para lograr mejores resultados se dejó escapar el aire, utilizando varios ductos de ventilación para evitar secciones con huecos.

Las pruebas de corazones de estas secciones comprobaron la homogeneidad del concreto a lo largo de toda la tubería. "Sin un concreto autocompactable no se podría estar realizando este proyecto con una programación tan ajustada y con tanto éxito".<sup>12</sup>



El segundo ejemplo del uso de los concretos autocompactables en este país es la reparación que se hizo a un puente construido a principios de los años sesenta en Rempenbruecke, en los Alpes Suizos. El puente presentaba grandes problemas por corrosión del acero de refuerzo y por aumento en la cantidad y tamaño de los vehículos que transitan en él.

Para repararlo, en el proyecto original primero se retiraba el concreto dañado de las dos secciones T que componían la estructura y se procedía a limpiar el acero de refuerzo.

A continuación, se añadía mayor cantidad de acero de refuerzo en otro lecho al original. De esta forma se requería poner nuevo concreto en la zona inferior de las dos vigas de concreto que formaban el puente.

El contratista decidió cambiar un poco el proyecto, al realizar una viga en medio de las dos existentes, utilizando como cimbra las partes internas de las vigas, la parte inferior de la plataforma del puente y una cimbra en la parte inferior de las vigas para contener a las zonas de las vigas ya existentes y la zona de la nueva.

Este diseño presentaba grandes ahorros en tiempo y en costos, pero al mismo tiempo se requería de un concreto que pudiera entrar desde abajo, atravesara por el cuantioso refuerzo de las secciones, que además no necesitara de vibrado y por si esto fuera poco una resistencia de 40 MPa. Para poder lograr el proyecto se utilizó un concreto autocompactable que fue bombeado desde el centro del puente en la parte inferior de la cimbra.<sup>12</sup>

De las experiencias obtenidas en estos dos ejemplos, me parece que las enseñanzas obtenidas se pueden usar en México para resolver muchos problemas. Creo que se puede pensar en métodos semejantes al segundo ejemplo para mejorar la infraestructura ya existente en nuestro país

### I.II.III. EXPERIENCIAS EN FRANCIA.

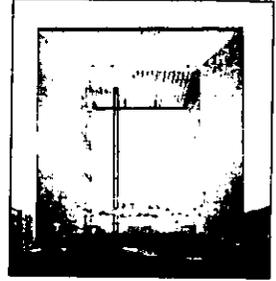
En este país existe un gran interés por el estudio de los concretos de alto desempeño. Se han dado muestras de varias obras en las que se les ha usado, algunas de ellas utilizando concretos

<sup>12</sup> Aplicaciones de concretos autocompactables que presentó Philippe Jost, Manu Santhanam y Juerg Schlumpf en una conferencia durante la convención de otoño de 1999 del American Concrete Institute.

autocompactables Uno de los ejemplos con concretos autocompactables es el Viaducto Sylans y El Gran Arco de Paris - la *Défense*. En este documento se tratará la aplicación que se le dio a los concretos autocompactables en El Gran Arco de Paris - la *Défense*.

En este importante proyecto participaron una gran cantidad de empresas constructoras, entre las que se encuentra el grupo Bouygues. Este grupo propuso para construir las principales vigas de la cubierta superior hacerlo por bombeo de concreto en obra falsa. El concreto debía tener, por especificación de proyecto, una resistencia

a 28 días de 50 MPa para las vigas que soportan la cubierta superior, las conexiones con los edificios laterales y los pilares.

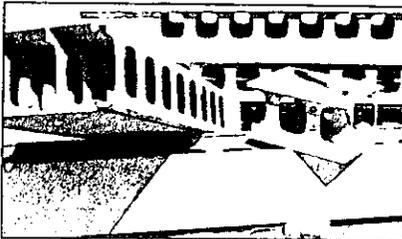


El Gran Arco de Paris - la *Défense*

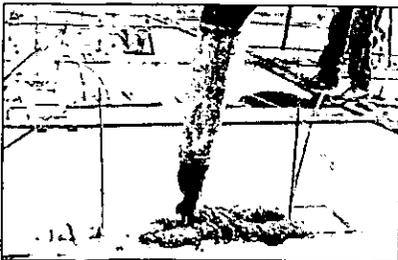
La distancia total de bombeo del concreto fue de 370 m, de los cuales 130 fueron verticales y 240 horizontales hasta la zona del colado. Esto se realizó a una relación de 40 m<sup>3</sup> de concreto/h, con una presión del orden de 6 MPa. Las dimensiones del edificio son: 108 m de ancho, 110 m de alto y 112 m de largo, ocupando un área mayor a una hectárea. Teniendo una masa aproximada de 300 000 ton. La estructura reposa en diez filas de seis pilas cada una. Los trabajos de construcción para realizar esta edificación duraron de julio de 1985 a julio de 1989.

#### I.II.IV. DESARROLLO EN MÉXICO.

En México, la utilización de concretos autocompactables ha sido bastante reducida, tanto que se le puede considerar inexistente. En los últimos años se han introducido al mercado mexicano aditivos con las características necesarias para hacer concretos autocompactables, pero el costo de estos productos es muy alto ya que en la mayoría de los casos no son de producción nacional. Actualmente existen al menos 3 marcas de aditivos que tienen productos con la tecnología suficiente para poder elaborar concretos autocompactables. Me parece importante que se puedan encontrar estos productos en el mercado nacional, ya que nos permite tener una nueva opción y por tanto la posibilidad de generar mayores beneficios a nuestra comunidad.



A continuación se presenta una de las obras en México donde se han usado concretos semejantes a los autocompactables. En el Fraccionamiento la Loma en Tultitlán, Estado de México, se están construyendo 420 casas habitación de interés social con concreto. El proceso constructivo utilizado en esta obra involucra estructuras modulares plásticas que se conectan entre sí y se rellenan de concreto, sirviendo así como cimbra y acabado exterior de los muros de concreto.



El vibrado es prácticamente imposible, ya que los muros tienen espesores muy pequeños y en ciertos puntos se encuentra acero de refuerzo, instalaciones eléctricas y sanitarias. Para lograr una correcta consolidación del concreto se requiere un concreto que necesite un vibrado mínimo, o bien, no ser vibrado.

El uso de concretos autocompactables en esta obra permite tener una cantidad de obreros menor en cada colado, mayor seguridad y mejorar la calidad final del producto. El concreto usado necesita ser vibrado, a pesar de su fluidez (revenimiento mayor a 20 cm), lo que

en cierta medida aumenta los costos constructivos y no permite tener una perfecta utilización de los beneficios que nos ofrecen los concretos autocompactables



A mi parecer, se ha desperdiciado el potencial de estos concretos en nuestro país, ya que tenemos la necesidad de crear una infraestructura económica, en la que toma vital importancia la durabilidad y el servicio que dará. Las posibilidades de uso de los concretos autocompactables son inmensas como se puede ver en las experiencias antes citadas.

## CAPÍTULO II

### OBTENCIÓN DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

Los concretos autocompactables requieren un diseño más complicado que los concretos normales. Las propiedades de cada uno de los elementos empleados en los concretos autocompactables tienen mayor influencia en las características finales de la mezcla, ya que este tipo de mezclas requiere de un comportamiento conjunto de los materiales para obtener las propiedades deseadas.

En los concretos normales es raro tener problemas con las características de la mezcla si se usa un tipo de arena u otro, mientras cumpla con los lineamientos propuestos por ASTM o por ACI en este rubro. El cumplir con ciertos requisitos no es suficiente en los concretos autocompactables, porque en ellos sí influyen de manera importante las relaciones existentes entre todos los componentes, que en muchas ocasiones no son tan importantes para los concretos normales (forma de los agregados, porcentaje de agregado fino respecto del grueso, etc.).

También es importante mencionar que las características de los concretos autocompactables son tanto de un material sólido como las de un líquido. Por estas razones las pruebas, diseñadas para las características de los concretos normales, no evalúan correctamente las propiedades más importantes de los concretos autocompactables. De hecho, alrededor del mundo se ha recurrido a diseñar nuevas pruebas que sirven para determinar con mayor precisión las características deseadas de los concretos autocompactables.

En este capítulo se describirán las diferentes metodologías empleadas por varios investigadores, las pruebas comunes para los concretos autocompactables necesarias para poder producirlos con una calidad adecuada, así como los criterios para determinar si un concreto es autocompactable.

#### II.1. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE MEZCLAS.

Existen varios métodos para desarrollar los concretos autocompactables que cuentan con diferentes enfoques para este efecto. Aquí se presentan únicamente tres de ellos, que pertenecen a reconocidos investigadores de esta nueva tecnología.

Me parece muy importante mencionar que se trata de un concreto que debido a la diversidad de materiales empleados, tiene las propiedades tanto de un líquido como las de un sólido, que habrá que tomar en cuenta para cualquier proceso constructivo o de preparación que involucren a estos concretos. Además, se debe garantizar la autocompactación y la trabajabilidad adecuada del concreto en estado fresco sin comprometer o disminuir otras propiedades igualmente importantes.

##### II.1.1. METODOLOGÍA DE TAKESHITA ET AL.

Dentro de los métodos que existen, está el de Takeshita et al. En este método al realizar las mezclas de pruebas para un concreto autocompactable se evalúa la relación existente entre la viscosidad y la cantidad de superplastificante. En este método la cantidad de superplastificante se asocia directamente con la propiedad de autocompactación.

Pero, como ya he citado anteriormente el concreto autocompactable no sólo depende de la dosificación de aditivos, sino que es todo un sistema compuesto por todos los elementos del concreto. Si no existen buenas características reológicas de la pasta o de los agregados no se logrará una buena autocompacción. De hecho, habrá un punto en el que por más aditivo plastificante que se añada a una mezcla no se mejore la capacidad de autocompacción. A este punto se le conoce como punto de máxima autocompacción. Por estas razones este método no es muy útil.

## II.I.II. METODOLOGÍA DE OKAMURA Y OZAWA.

Este método consiste en disminuir el porcentaje de agregado en la mezcla, reduciendo la cantidad de energía perdida por fricción al tener colisiones con obstáculos y entre las mismas partículas de los agregados. Según los diseñadores de este método "es conveniente en este método utilizar una relación agua/polvos volumétrica aproximada a 1.0 para proveer de una viscosidad adecuada a la pasta y así evitar la segregación y garantizar la compactación"<sup>1</sup>. De esta forma las partículas de agregado quedan lubricadas por una pasta que facilita la fluidez y la cohesión de la mezcla.

Este método normalmente converge en mezclas con altos contenidos de cemento, lo que obliga a cambiar parte del cemento por aditivos minerales para evitar los problemas generados en el concreto por altos contenidos de cemento. Los aditivos minerales empleados pueden ser escoria de alto horno, ceniza volante, polvo de caliza y microsilica. El uso de superplastificantes es requerido en este método como material de soporte y no como material base e indispensable, a diferencia del enfoque anterior.

## II.I.III. METODOLOGÍA DE SHINDO Y MATSUOKA.

El último método que se tratará en este documento es el de Shindo y Matsuoka que consiste en añadir a una mezcla muy fluida un agente que inhiba la segregación. Este método requiere que exista una correcta dosificación de los elementos constitutivos del concreto, en especial de los agregados, ya que se enfoca en proveer a la pasta mayor consistencia para que permanezca junto con los demás materiales.

Independientemente del método a utilizar, se debe dar una adecuada viscosidad y deformabilidad a la pasta. Lo ideal es tener al mismo tiempo una viscosidad alta y una deformabilidad muy buena de la pasta. La pasta debe ser lo suficientemente viscosa para evitar el asentamiento del agregado grueso y así poder mantener uniformidad en el concreto, pero no demasiado que evite la autocompacción. Al conseguir una pasta con estas características además traerá el beneficio de reducir la fricción entre los agregados y propiciar la fluidez y autocompacción.

## II.II. PRUEBAS NORMALES PARA CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

Existen dos características importantes que se deben medir en los concretos para determinar si son autocompactables o no. Estas son la autocompacción y la habilidad para pasar por lugares estrechos. Para lograr evaluar estas dos características, se requieren de métodos no convencionales, ya que los métodos convencionales no contemplan a detalle estos factores.

<sup>1</sup> Okamura y Ozawa. *SP 159-2 Self compactable high performance Concrete in Japan* Japón

Para poder tener parámetros de comparación más precisos entre concretos autocompactables, se han propuesto varios tipos de pruebas que miden alguna característica aislada o varias en conjunto. Por ser una tecnología de reciente aparición existen diferencias de criterios y características de los aparatos utilizados en las pruebas que miden una misma característica, estas diferencias se ven marcadas en los principales centros del conocimiento de esta tecnología como son Japón y Suecia. En general todas las pruebas que se han propuesto tienden a ser prácticas, repetibles y controlables.

Desgraciadamente, la normatividad se ha dado de manera local y en general la normatividad mundial en las pruebas de los concretos autocompactables se ha retrasado debido principalmente a que no se han usado los concretos autocompactables de modo frecuente en todo el mundo.

Recientemente han existido varios esfuerzos por tratar de homologar los criterios de evaluación a usar en los concretos autocompactables, fomentándose congresos y asociaciones como *Self Compacting Concrete Net*, en la que participan connotados investigadores de todo el mundo.

Las pruebas más utilizadas para poder comparar las características de los concretos autocompactables son: la prueba de *Slump Flow*, flujo en el embudo V, la prueba del tubo U, la prueba U modificada, la prueba de la Caja tipo L, la prueba de compactación, flujo en el embudo O, flujo en el cono de Marsh, pruebas en el reómetro, la prueba *in situ* propuesta por Okamura, etc. A continuación describo las características y procedimientos de las pruebas más usadas y útiles.

### II.II.I. PRUEBA SLUMP FLOW.

Esta prueba sirve para medir la fluidez, cohesividad y tendencia al sangrado de la mezcla. Esta prueba se realiza de manera muy semejante a la prueba normal de revenimiento (se usan los mismos dispositivos) pero con la diferencia de lo que se mide, en la prueba clásica un desnivel entre la condición inicial y la final, en el *Slump Flow* el promedio de dos diámetros del esparcimiento final de la mezcla.

El rango de los valores que se debe obtener de las pruebas de *Slump Flow* será del orden de 600 mm a 750 mm<sup>2</sup>. Para realizar la prueba se requiere de una superficie plana y amplia, y un cono, cuyas dimensiones serán: 200 mm de diámetro inferior, 100 mm de diámetro superior y 300 mm de altura. Para poder realizar esta prueba, el concreto que se pruebe deberá tener un revenimiento mínimo de 200 mm.

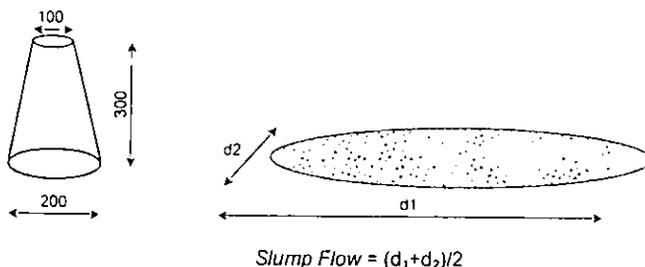
La metodología de la prueba consiste en llenar por completo el cono con el concreto, apoyando el cono contra la superficie de prueba para que no se escape el concreto por la parte inferior, que se comporta como un fluido denso. A diferencia de la prueba de revenimiento, el concreto se coloca en una sola exposición sin ser compactado.

Para realizar esta operación, se recomienda el uso de un recipiente que pueda contener todo el volumen requerido y que facilite su descarga al cono. Al terminar el llenado, se levanta el cono lentamente (en un tiempo de 5 segundos aproximadamente), dejándolo fluir hasta obtener el máximo esparcimiento del concreto.

Cuando el concreto alcanza su máximo esparcimiento se mide el diámetro mayor dejado por la mezcla de concreto ( $d_1$ ), después se mide el diámetro perpendicular al diámetro mayor ( $d_2$ ). El resultado de la prueba es el promedio de los dos diámetros medidos.

<sup>2</sup> De acuerdo a los valores propuestos en el *International Workshop on Self Compacting Concrete*

En la figura siguiente, se encuentra un diagrama del cono de revenimiento y como se realiza la prueba de *Slump Flow* (las acotaciones se encuentran en mm)

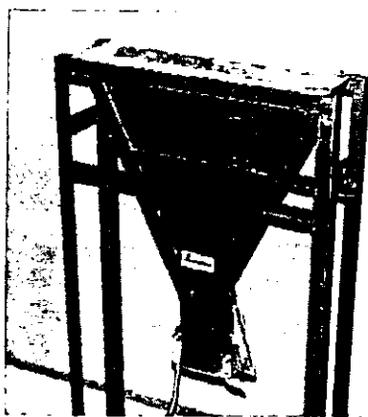


## II.II.II. PRUEBA DEL EMBUDO TIPO V.

Esta prueba sirve para poder comparar la viscosidad relativa de las mezclas de concreto, midiendo el tiempo que tarda un volumen constante de mezcla al salir del dispositivo diseñado para esta prueba.

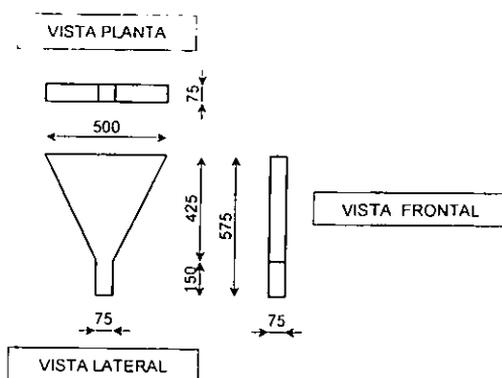
En esta prueba influyen tanto la viscosidad como la cohesión de la mezcla, ya que al presentarse una menor viscosidad, el tiempo será menor, pero si la viscosidad disminuye demasiado, existirá una segregación que generará un flujo intermitente o una interrupción en el flujo. Por el otro lado, si se presenta una mezcla poco fluida no podrá salir por el orificio inferior del dispositivo porque sus componentes se quedarán atascados dentro del modelo. Por lo tanto cuando se obtenga el tiempo mínimo de una mezcla se obtendrán las proporciones óptimas de los materiales constitutivos de la mezcla y la viscosidad óptima.

La prueba se desarrolla llenando el dispositivo de la prueba con la mezcla a probar, manteniendo el orificio de salida tapado. Se destapa el cono y se toma el tiempo desde esa acción hasta que se vacíe por completo el aparato. El dispositivo para la prueba es el que se presenta en la figura anexa (todas las dimensiones se encuentran en mm).



Fotografía del dispositivo Embudo Tipo V<sup>3</sup>

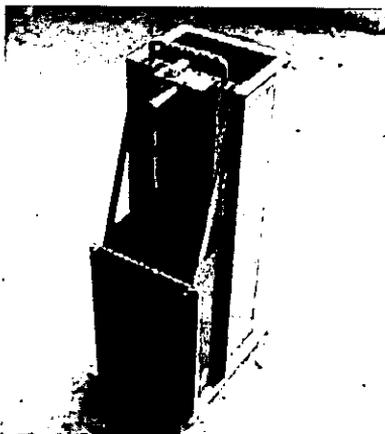
<sup>3</sup> Se extrajo esta fotografía de *Self Compaction Evaluation For Mix Proportioning & Inspection*, de la página de internet del *Self Compacting Concrete net net* (<http://infra.kochy-tech.ac.jp/jsccnet/>)



Al realizar las pruebas con este dispositivo es muy importante tener espacio suficiente entre el orificio de salida y la superficie para que al salir el concreto no se acumule en el orificio estorbando la evacuación del resto del concreto.

### II.II.III. PRUEBA U MODIFICADA.

En esta prueba se trata de evaluar la habilidad del concreto al fluir a través de huecos entre obstáculos utilizando unicamente la diferencia de presiones producida por el peso del concreto en un extremo y en el otro extremo la presión atmosférica.



Fotografía del dispositivo para la Prueba U Modificada<sup>4</sup>

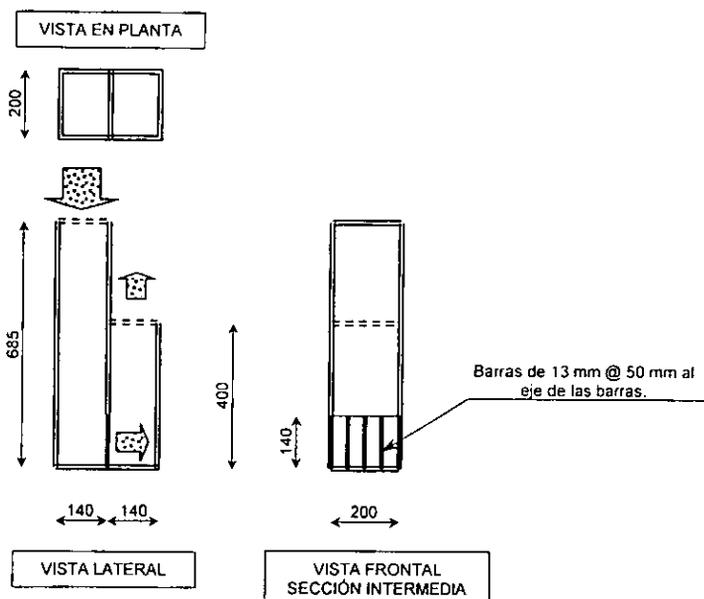
El aparato que sirve para esta prueba se compone de dos cajas rectangulares unidas en uno de sus costados, en la parte más baja de la unión se encuentran barras lisas de 13 mm de

<sup>4</sup> Se extrajo esta fotografía de *Self Compactibility Evaluation For Mix Proportioning & Inspection*, de la página de internet del *Self Compacting Concrete net net* (<http://inira.kochy-tech.ac.jp/isccnet/>)

diámetro puestas verticalmente. En la unión de las cajas rectangulares deberá existir un dispositivo que impida el paso del concreto, pero que sea removible para que se pueda realizar la prueba.

Para realizar la prueba, se llena la caja de mayor altura del modelo (ver la figura del modelo) con el concreto a probar hasta el borde, después se deja el concreto ahí durante un minuto y después se remueve la pared que impide el paso del concreto.

Se deja que el nivel del concreto en la caja que estaba hueca se estabilice y luego se mide su altura. En esta prueba, cuando la diferencia entre los dos niveles finales del concreto sea menor, se tendrá una mejor autocompactación. Las dimensiones de la caja aparecen en el dibujo anexo (todas las acotaciones en mm). Para los concretos autocompactables se debe esperar una diferencia menor a 50 mm entre los dos niveles de las cajas.



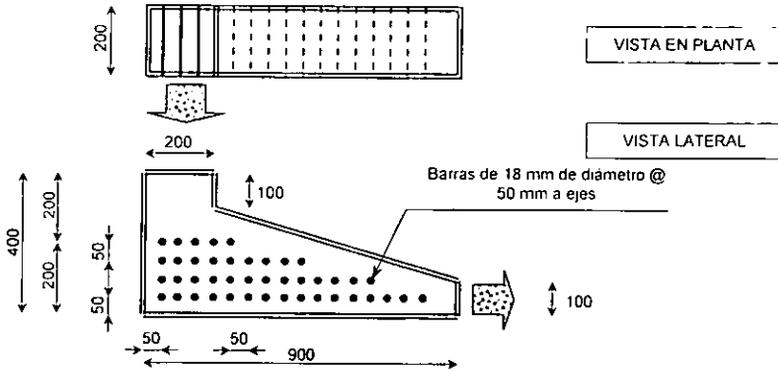
#### II.II.IV. PRUEBA DE LA CAJA L.

Esta prueba sirve para medir la capacidad de autocompactación y cohesividad del concreto y su posibilidad de desplazamiento horizontal. Esta prueba es algo similar a la prueba U modificada, pero la disposición de las cajas es una vertical y la otra horizontal.

En esta prueba las dimensiones del equipo para hacer la prueba dependerá del tamaño del agregado y la altura de la columna de concreto que se probará. Las dimensiones y procedimientos de las pruebas se encuentran estipulados en la publicación sobre Concretos Autocompactables de RILEM<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Varios, *Manual of the Proceedings of Self Compacting Concrete, RILEM*, Estocolmo, Suecia 1998.

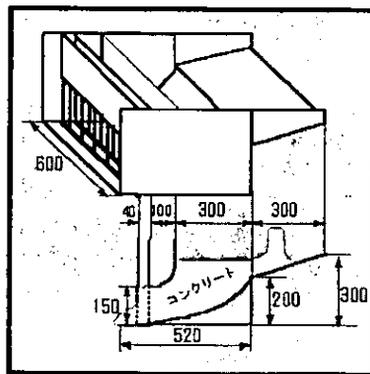
Para esta prueba se llena el dispositivo y terminada esta acción se deja salir al concreto por un dispositivo encontrado en la parte inferior. Para ser concreto autocompactable debe fluir el concreto. Las especificaciones de prueba que proponen los japoneses, se encuentran establecidas en el diagrama que se muestra a continuación (todas las acotaciones se encuentran en mm)



#### II.II.V. PRUEBA *IN SITU* PROPUESTA POR OKAMURA.

Las pruebas anteriores son para evaluar porción del concreto que se utilizará, pero no evalúa todo el concreto que se va a usar. El ingeniero Hajime Okamura propone una prueba que mide las propiedades del concreto durante su transporte de la olla al lugar de destino. De esta forma se puede evaluar de manera constante (y no puntual como las otras pruebas) las características del concreto antes de ser colocado en obra de manera sencilla y rápida, que no requiere de mayor conocimiento técnico.

En esta prueba se hace descargar el contenido de una olla en un dispositivo con las dimensiones que a continuación se muestran (todas las dimensiones se encuentran en mm), si el concreto logra atravesar el dispositivo se le considera autocompactable y aceptable para su utilización en obra. Caso contrario, se debe rechazar el concreto por no ser autocompactable.



Dimensiones del dispositivo

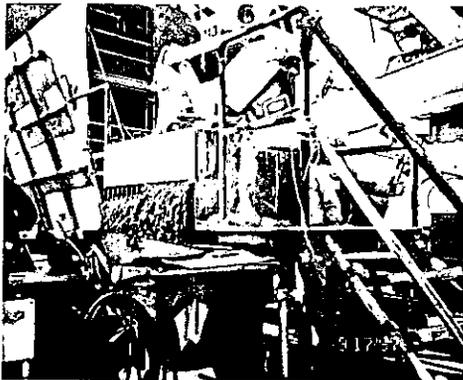


Gráfico del dispositivo al ser utilizado en obra.<sup>6</sup>

### II.III. PRUEBAS ALTERNAS.

Existe un gran número de pruebas que por la reciente aparición de estos concretos se han propuesto en diversos centros de investigación. En algunos casos son unos ciertos cambios a los dispositivos o metodología de las pruebas originales, para poder aislar alguna característica específica o bien añadir otros parámetros a las pruebas.

En otras ocasiones las pruebas son tan simples como bloques de concreto, miembros con detalles en su construcción, etc. Algunos investigadores proponen pruebas muy complejas, en las que se utilizan conjuntos de elementos estructurales con dispositivos especiales en su interior que medirán desde esfuerzos en el refuerzo, hasta el cambio de presión en un conducto, como las pruebas que se realizaron para el diseño del proceso constructivo de las columnas de la Torre Landmark en Yokohama, Japón.

Día a día, se hacen esfuerzos para poder tener una mayor cantidad de lineamientos internacionales respecto de los concretos autocompactables que faciliten su implementación. De igual modo, las pruebas que sean menos prácticas desaparecerán y se utilizarán únicamente las que den la información más adecuada, que sean repetibles, prácticas y que se utilicen internacionalmente.

### II.IV. DETERMINACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

La determinación de un concreto autocompactable es difícil ya que un concreto puede tener un desempeño aceptable en alguna de las pruebas, pero en otras no tener un desempeño bueno. Por eso, para el diseño de mezclas se aplican diferentes pruebas y se observa objetivamente el comportamiento del concreto en todas y cada una de ellas.

<sup>6</sup> Se extrajo esta fotografía de *Self Compaction Evaluation For Mix Proportioning & Inspection*, de la página de internet del *Self Compacting Concrete net* (<http://infra.kochy-tech.ac.jp./scsnet/>)

Para ser catalogados los concretos como autocompactables, en las pruebas que se describieron anteriormente se deben obtener resultados que se encuentren en los rangos que se marcan en la tabla siguiente:

**Tabla 2.1. Resultados Esperados en un Concreto Autocompactable.**

Prueba	Resultados Esperados
Slump Flow	600 a 750 mm.
Prueba U Modificada	Diferencia final entre los recipientes menor o igual a 50mm.
Embudo Tipo V	Tiempo de 8 a 20 segundos, con un flujo constante
Caja tipo L	Desempeño Bueno a Excelente, dependiendo del dispositivo que se utilice.
Prueba In Situ, Okamura	Flujo constante.

Al probar los concretos autocompactables se debe buscar que en todas las pruebas efectuadas las mezclas mantengan una cohesividad y homogeneidad adecuada para su uso, ya que de presentarse problemas en alguna prueba en particular se puede esperar que durante su uso en obra no tenga las características necesarias para lograr un concreto que tenga un desempeño que justifique la nueva tecnología que se está usando.

También se debe buscar que el desempeño de las mezclas en las pruebas no sea muy diferente durante un tiempo considerable (1 hora cuando menos), ya que se debe tener en cuenta que el uso final del concreto será en obra, donde las condiciones no se encuentran controladas como en un laboratorio y se requiere que el concreto conserve sus características durante el tiempo de entrega, el tiempo de espera en obra, tiempo de descarga y colocación en obra.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta durante las pruebas de diseño de las mezclas, es el fraguado, ya que una de las principales ventajas de este tipo de concretos se encuentra en la velocidad en la que se coloca.

## CAPÍTULO III

### CONTROL DE EXPERIMENTOS Y TRABAJO EN LABORATORIO.

De todo el material bibliográfico en el que baso mi tesis, he encontrado que uno de los puntos críticos al realizar concretos autocompactables es el control de experimentos y trabajo en el laboratorio, debido a que se requieren hacer varios intentos previos para poder llegar a una mezcla adecuada y si no se tiene claro el trabajo, se puede desperdiciar información y tiempo.

En este capítulo describiré los procedimientos, metodología y normatividad que aplicaré para el desarrollo de concreto autocompactable. De igual manera reportaré los resultados obtenidos de las pruebas que realicé.

#### III.1. MATERIALES.

Debido a que cada material que se emplea en una mezcla de concreto autocompactable influye en su desempeño como conjunto y para evitar introducir variables no deseadas, yo utilicé un solo tipo de agregado grueso, un solo tipo de agregado fino, un tipo de cemento y tres aditivos diferentes para el diseño de mezclas. A continuación describiré las principales características y pruebas que se les determinaron.

##### III.1.1 CEMENTANTES.

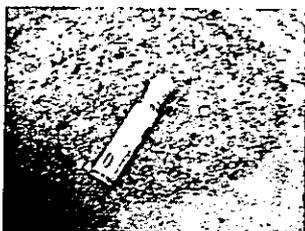
El cemento que utilice (Cemento Pórtland Ordinario Apasco) cumple con los lineamientos de cemento CPO que tiene la normatividad mexicana para este tipo de cementos. Este cemento se elabora cumpliendo con un estricto control de calidad, por lo que no se le debió de hacer mayor cantidad de pruebas. El otro cementante utilizado para las pruebas de mezclas será ceniza volante clase F.

##### III.1.2. AGREGADOS.

El agregado grueso se compone de piedra Caliza triturada con un tamaño máximo de agregado de 20 mm, que cumple con la normatividad mexicana para este caso. Al agregado grueso le determine su peso específico, su absorción y su granulometría.



El agregado fino se compone de arena del río Lázaro Cárdenas (Apasco) que cumple con las características que requiere la normatividad mexicana. Al agregado fino le determiné su peso específico, su absorción y su granulometría.



### III.I.III. ADITIVOS.

Los aditivos se componen de tres tipos diferentes: Un reductor de agua de alto rango que cumple con las especificaciones ASTM C-494 A y F (Eucon 37, Eucomex), un reductor de agua de alto rango basado en éter policarboxílico que cumple con la norma ASTM C-494 A y F (Rheobuild 3000FC, MBT), un aditivo antideslave (Rheomac UW450, MBT).



En la grafica aparecen de izquierda a derecha aparecen Eucon 37, Rheobuild 3000FC y el Rheomac UW450.

### III.II. METODOLOGÍA.

Para obtener concretos autocompactables, existen varios métodos que nos ayudan a desarrollar el concreto deseado y que cumpla con las características del proyecto, cada uno de estos métodos cuenta con un enfoque diferente, como ya lo describí en el capítulo anterior. Por sus características, me parece que el método más adecuado para poder generar a gran escala los concretos autocompactables en México es el de Okamura y Ozawa, y por tal motivo lo utilizaré para este trabajo.

La manera de alcanzar un concreto autocompactable con este método, permite dejar una cantidad constante, tanto de cemento como de aditivos (los materiales caros en el concreto) y únicamente se cambian las proporciones de los agregados, buscando mejorar las propiedades de fluidez y cohesión del concreto.

Utilizando las recomendaciones que hacen varios investigadores y especialistas en este tipo de concretos, la mezcla a partir de la cual voy a comenzar el diseño de mezcla de Concreto autocompactable tiene las siguientes características:

- El agregado grueso es 50% del volumen total preparado.
- El agregado fino tiene una proporción de 40% del mortero, lo que equivale a un 20% del volumen total.
- Relación agua/cementantes de 0.5 para obtener un concreto con resistencia a 28 días de 25 MPa.
- El porcentaje de Ceniza Volante del total de cementantes es de 20%.
- Una relación volumétrica de agua/polvos del 1%.
- Utilización máxima de los aditivos reductores de alto rango.

**3.1 Tabla de Proporciones de la Mezcla Base de Diseño.**

Componente	Porcentaje del Volumen Total de la Mezcla
Agregado Grueso	50
Agregado Fino	20
Cemento	10
Valores de las Relaciones de Materiales de la Mezcla Base de Diseño	
Volumen total de Agregado Grueso por $m^3$ de mezcla ( $G/G_{lim}$ )	0.50
Volumen de Agregado Fino en el Mortero ( $S_c/M$ )	0.40
Relación Agua Cementantes ( $A/C$ )	0.50
Relación Volumétrica de Agua Polvos ( $V_w/V_p$ )	1.0

A la mezcla inicial primero observaré su textura, fluidez y cohesión para poder evaluar de manera inicial sus características y los cambios que pudiera necesitar. Después le realizaré las pruebas de Slump Flow y la Prueba del Embudo Tipo V.

Si no cumple con los valores esperados de un concreto autocompactable, se le harán las modificaciones adecuadas para mejorarlas, ya sea bajar el contenido de agregado grueso, disminuir la cantidad de agua, aumentar la cantidad de aditivos, etc.

Con esta metodología se trata de lograr una mezcla que tenga las propiedades necesarias para ser autocompactable y que sea la más económica, por lo tanto se busca reducir la cantidad de aditivos y cemento.

### III.III. ESPECIFICACIONES PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS.

Después de tener el diseño de mezcla a preparar, haré una prueba con pequeñas cantidades de mezcla (10 litros). Para esta prueba la revoltura de los materiales será con las manos para poder tener un contacto con la textura de la mezcla y así, evaluar las proporciones de los materiales de la mezcla. De esta forma podré observar la conveniencia de añadir o quitar parte de un cierto material.

Cuando se presente una mezcla con las características adecuadas o que requiera de mayor energía mecánica para el mezclado, la realizaré en una mezcla de 50 litros. El proceso de incorporación de los materiales será el mismo en ambos casos y se encuentra descrito en los párrafos siguientes.

Para poder garantizar que no existirá contaminación en los materiales, éstos serán colocados en recipientes separados y que impidan el contacto con la humedad del ambiente. Los cementantes serán almacenados por separado en bolsas de plástico gruesas, los agregados

estarán guardados en tambos de acero con tapa y los aditivos serán mantenidos en recipientes que facilite el fabricante para cada uno de ellos.

Esta separación y almacenamiento tiene ciertas implicaciones en los agregados, ya que al mantenerlos almacenados en tambos, la homogeneidad dentro de los contenedores no está garantizada. Lo que implica que para poder hacer uso de cualquiera de estos dos materiales habrá que realizar una homogenización previa de todo el contenido de los tambos. De esta manera garantizaremos usar durante todo el tiempo un material con las mismas propiedades granulométricas. De igual forma, la humedad en los agregados quedará uniforme para una misma mezcla. Previo a esta acción, se deberá limpiar el área en la que se mezclarán los agregados para evitar la contaminación del material.

Terminada la homogenización de la arena y de la grava se tomará una muestra representativa de cada una para determinar su contenido de agua y poder hacer los ajustes necesarios del agua de mezcla. Después se separará la cantidad de material requerida para hacer la mezcla y el resto del material se volverá a colocar dentro de sus contenedores.

Para evitar una pérdida de humedad de los agregados, éstos se deberán mantener cubiertos de manera que permanezcan en la condición inicial de humedad. Una vez que se conozca la humedad de los agregados se hará el ajuste en el proporcionamiento y se procederá a pesar los materiales de acuerdo con las cantidades que se requieran de cada uno de ellos en la mezcla que se pretenda realizar.

El proceso de mezclado de los ingredientes del concreto para cualquier mezcla será de acuerdo a la norma ASTM C-94 y la ASTM C-192. En la norma ASTM C-94 se especifica que la velocidad para realizar el mezclado en revolvedoras de  $50 \text{ dm}^3$  será de 70 a 100 revoluciones por minuto. En las mezclas que se realicen a mano, la revuelta de los materiales será de manera vigorosa y cumpliendo con los tiempos establecidos en las normas para revolvedoras.

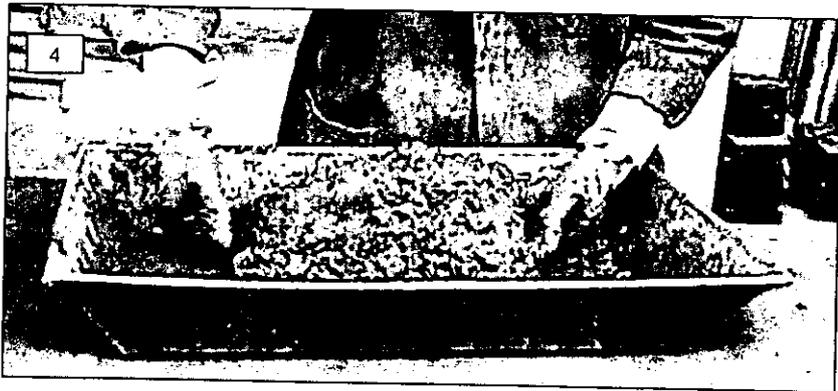
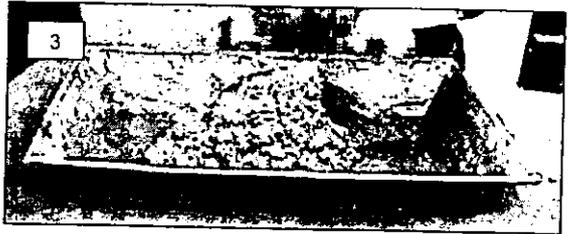
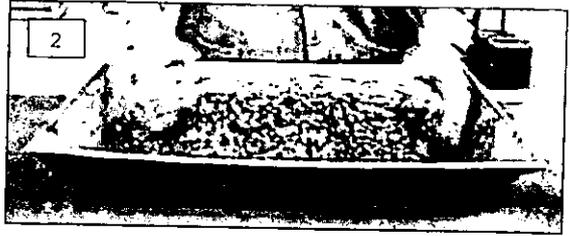
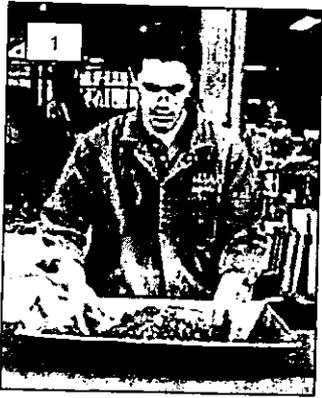
La norma ASTM C-192 indica que los materiales se deberán encontrar a una temperatura entre 293 y 298 °K (20 a 25 °C), que los agregados deberán estar saturados superficialmente secos y que el cemento no tenga grumos. También se recomienda hacer un mortero antes de hacer la mezcla que queremos probar, que tenga las características del mortero de la mezcla a probar para que se adhiera a las paredes de la revolvedora y de esta forma evitar que el mortero de la mezcla sea el que se adhiera cambiando las proporciones de la mezcla y por tanto, sus propiedades tanto de estado fresco, como de estado endurecido.

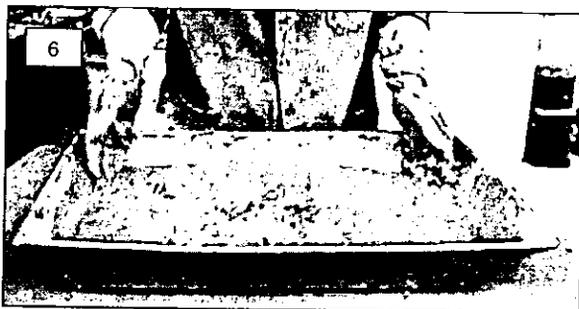
La secuencia para introducir los materiales, primero se añade el agregado grueso y parte del agua de mezclado, se inicia un periodo de homogenización al hacer girar la revolvedora unas cuantas revoluciones, incorporando en este periodo en el siguiente orden el resto de los materiales: el agregado fino, los cementantes y el resto del agua junto con los aditivos.

Como actividad siguiente se hace el mezclado del concreto durante 3 minutos, al término se dejará reposar la mezcla durante 3 minutos, cubriendo con un paño húmedo la abertura de la revolvedora para evitar pérdidas de agua de mezclado por evaporación y para finalizar, se deberá hacer un periodo adicional de mezclado de 2 minutos.

Después de preparadas las mezclas, procederé a evaluar sus propiedades autocompactables en estado fresco, paso siguiente se realizará un remezclado de 2 minutos para homogenizar el material y preparar los cilindros para las pruebas del concreto endurecido.

La siguiente secuencia de gráficos ejemplifica el proceso de mezclado a mano. Primero se mezclan, un poco de agua y el agregado grueso (1), paso siguiente se mezcla la arena (2). Después se mezclan los cementantes hasta obtener una masa homogénea (3 y 4), terminada esta acción se añade el agua y los aditivos (5), se termina de mezclar y se obtiene el concreto (6).





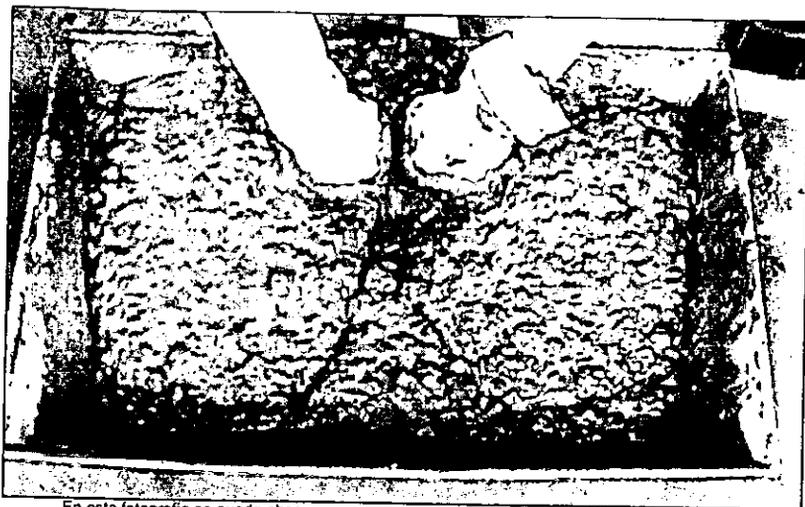
Fotografía de la mezcladora de 50 litros en la que se preparaban las mezclas.

### III.IV. PRUEBAS REALIZADAS A LAS MEZCLAS.

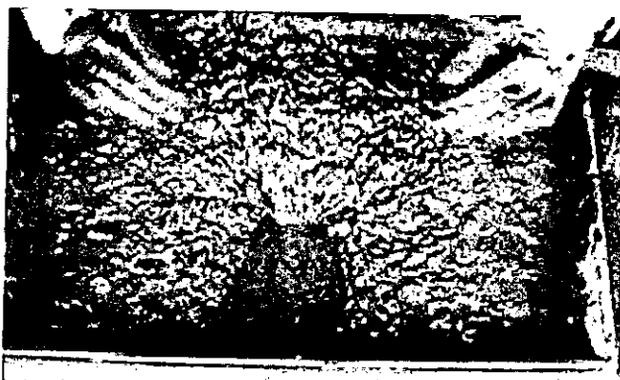
A las mezclas se les harán varias pruebas para poder determinar si son o no autocompactables. La primera prueba que les realizaré será una inspección de su consistencia, fluidez y viscosidad al hacer un mezclado a mano, para poder descartar las mezclas que no cumplan con una adecuada proporción y realizar los ajustes que sean pertinentes para que tengan las características deseadas.

Las proporciones que cumplan con los mínimos buscados de fluidez y cohesión se les realizará a una escala mayor para aplicarles la prueba Slump Flow, con la cual se pueden observar de manera más objetiva ciertas características de la mezcla como es su fluidez y su cohesión.

Cuando una mezcla cumpla con las dos pruebas anteriores se le realizará la prueba del Embudo Tipo V. Esta prueba no sólo requiere que la mezcla probada tenga una fluidez y cohesión adecuada, sino que además requiere de un nivel bueno de autocompactación.



En esta fotografía se puede observar un concreto que mantiene una consistencia homogénea en toda su masa, tiene una viscosidad adecuada y una fluidez alta.



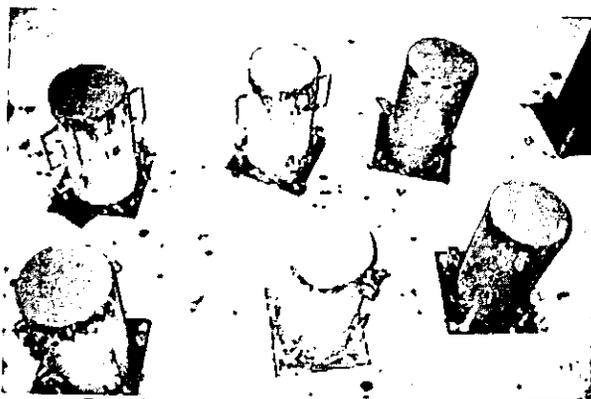
Aquí se puede observar como el concreto fluye de manera casi instantánea sin segregarse o sangrar



En esta fotografía se ve claramente que el borde de la masa de concreto forma un menisco y no permite la segregación de sus elementos, fluyen en conjunto.

A las mezclas que tengan un comportamiento aceptable en las tres pruebas, se les repetirá en una mezcla de mayor volumen, para poder volver a probar sus características y hacer ocho cilindros de concreto, de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto, para probarlos a compresión y determinar la resistencia a 28 días de la mezcla.

Los cilindros se realizarán de dos maneras, una cumpliendo la normatividad establecida para este tipo de cilindros (dos cilindros), los otros cilindros se realizarán llenando en una sola capa los cilindros (seis cilindros), sin varillarlos para poder comparar la autocompactación que tendrían estos concretos respecto de los cilindros compactados por varillado o vibrado. De esta forma obtendré un valor de peso volumétrico promedio para cada condición y de igual manera podré observar diferencias en la resistencia final de los concretos autocompactables al ser vibrados o bien colocados directamente.



Fotografía de los cilindros para las pruebas a compresión.

### III.V. ESPECIFICACIONES DE CURADO.

En la norma ASTM C-192 se estipula que después de realizados los cilindros de prueba se deberán de mantener protegidos mediante una placa no absorbente y no reactiva o con una tela de plástico durable e impermeable. Manteniéndose de esta forma hasta ser descimbrados, periodo que no será menor a 20 horas ni mayor a 48 horas.

El curado de las probetas de prueba a compresión será en un cuarto húmedo a una temperatura de  $296 \pm 2$  °K. Este cuarto húmedo mantiene la humedad relativa en niveles superiores al 95% a partir de aspersores de niebla, siguiendo con la norma ASTM C-109 para curado de probetas de prueba.

### III.VI. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

En este apartado se encuentran los resultados que obtuve de las pruebas que le realice tanto a los materiales como a las mezclas de prueba para obtener una mezcla autocompactable.



### III.VI.II. PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS REALIZADAS.

Material	Mezcla 1		Mezcla 2	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	% de un m <sup>3</sup>
Grava	50.00%	1393.000	Grava	50.00%
Arena	20.00%	526.000	Arena	20.00%
Cemento	9.25%	292.216	Cemento	9.25%
Ceniza Volante	1.66%	51.570	Ceniza Volante	1.66%
Agua	17.00%	170.000	Agua	17.00%
Aire	1.60%	0.000	Aire	1.60%
Rhoemoac UW450	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	Rhoemoac UW450	0.0 ml/kg cemento
Rheobuild 3000	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	Rheobuild 3000	0.0 ml/kg cemento
Eucon 37	9.0 ml/kg cemento	3.094 litros	Eucon 37	9.0 ml/kg cemento
Total	99.82%	2436.530	Total	99.82%
Xg de finos por m <sup>3</sup>	472.466		477.441	
Rel. A/(C+CV)	0.500		0.5	
Rel. CV/(C+CV)	15.00%		15.00%	
Relación Grava-Arena	73%	27%	65%	35%
Observaciones	Esta mezcla tuvo un comportamiento no adecuado, debido principalmente a ser demasiado gravosa y tener pocos muy pocos finos. Sobraba agua.		Tuvo un mejor comportamiento al aumentarle la cantidad de arena y finos, pero aún no fluye como debería. Se sentía un poco gravoso, le sobra agua.	
Consistencia	No adecuada		No adecuada	
Revenimiento	No se realizó		No se realizó	
Slump Flow	No se realizó		No se realizó	
Embudo Tipo V	No se realizó		No se realizó	

Material	Mezcla 3		Mezcla 4	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg
Grava	44.52%	1240.322	44.48%	1239.319
Arena	29.68%	780.581	29.66%	779.949
Cemento	7.12%	225.000	7.12%	225.000
Ceniza Volante	1.78%	75.000	1.78%	75.000
Agua	15.00%	150.000	15.00%	150.000
Aire	1.60%	0.000	1.60%	0.000
Rhoemoac UW450	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Rheobuild 3000	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Eucon 37	10.0 ml/kg cemento	3.000 litros	12.0 ml/kg cemento	3.600 litros
Total	100.000%	2470.903	100.000%	2469.268
kg de finos por m <sup>3</sup>	490.961		490.806	
Rel. A/(C+CV)	0.5		0.5	
Rel. CV/(C+CV)	25.00%		25.00%	
Relación Grava-Arena	60%	40%	60%	40%
Observaciones	Mejoró su consistencia, pero no es suficiente, fluye mejor pero aún no lo suficiente para ser autocompactable. Probablemente la dosificación de aditivo este baja.		La consistencia es adecuada para la viscosidad, pero la fluidez no fue suficiente. Es posible que se requiera de una cantidad mayor de cemento y de aditivos para lograr la autocompactación.	
Consistencia	No adecuada		Adecuada	
Revenimiento	No se realizó		18.00 cm	
Slump Flow	No se realizó		50.00 cm	
Embudo Tipo V	No se realizó		No se realizó	

Material	Mezcla 5		Mezcla 6	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg
Grava	40.21%	1120.276	39.50%	1100.568
Arena	32.90%	865.266	32.32%	850.044
Cemento	7.91%	250.000	8.90%	281.250
Ceniza Volante	1.98%	83.333	2.23%	93.750
Agua	15.00%	150.000	15.00%	150.000
Aire	1.60%	0.000	1.60%	0.000
Rhoemoac UW450	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Rheobuild 3000	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Eucon 37	12.0 ml/kg cemento	4.000 litros	12.0 ml/kg cemento	4.500 litros
<b>Total</b>	<b>100.000%</b>	<b>2468.875</b>	<b>100.000%</b>	<b>2475.613</b>
Kg de finos por m <sup>3</sup>	545.011		582.954	
Rel. A/(C+CV)	0.45		0.4	
Rel. CV/(C+CV)	25.00%		25.00%	
Relación Grava-Arena	55%	45%	55%	45%
Observaciones	Con este aditivo se requiere aumentar aún mas la cantidad de cementantes y aditivos lo que hace esta mezcla extraordinariamente cara y por tanto no viable.		Aún con este aumento en la proporción de aditivos y cementantes, no se consiguió un concreto autocompactable, por tal motivo cambiaré de aditivo.	
Consistencia	Adecuada		Adecuada	
Revenimiento	22.00 cm		25.00 cm	
Slump Flow	55.00 cm		57.50 cm	
Embudo Tipo V	No se realizó		No se realizó	

Material	Mezcla 7		Mezcla 8	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg
Grava	46.98%	1308.985	43.34%	1207.384
Arena	25.30%	665.375	28.89%	759.852
Cemento	8.61%	272.000	8.61%	272.000
Ceniza Volante	1.29%	48.000	1.29%	48.000
Agua	15.00%	160.000	16.00%	160.000
Aire	1.60%	0.000	1.60%	0.000
Rhoemoac UW450	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Rheobuild 3000	8.0 ml/kg cemento	2.1760 litros	10.0 ml/kg cemento	2.720 litros
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
<b>Total</b>	<b>100.000%</b>	<b>2454.356</b>	<b>100.000%</b>	<b>2447.236</b>
Kg de finos por m <sup>3</sup>	482.776		505.890	
Rel. A/(C+CV)	0.5		0.5	
Rel. CV/(C+CV)	15.00%		15.00%	
Relación Grava-Arena	65%	35%	60%	40%
Observaciones	Existe una segregación muy grande y un excedente de agua abundante.		Mejoró significativamente la consistencia de la mezcla, pero todavía en un poco gravosa, además la fluidez no es la esperada	
Consistencia	No adecuada		No adecuada	
Revenimiento	No se realizó		No se realizó	
Slump Flow	No se realizó		No se realizó	
Embudo Tipo V	No se realizó		No se realizó	

Material	Mezcla 9		Mezcla 10	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg
Grava	40.70%	1133.873	40.79%	1136.387
Arena	33.30%	875.767	33.37%	877.709
Cemento	7.59%	240.000	7.12%	225.000
Ceniza Volante	1.52%	60.000	1.78%	75.000
Agua	15.00%	150.000	15.00%	150.000
Aire	1.60%	0.000	1.60%	0.000
Rhomoac UW450	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	1.0 ml/kg cemento	0.225 litros
Rheobuild 3000	12.0 ml/kg cemento	2.880 litros	14.0 ml/kg cemento	3.150 litros
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Total	100.000%	2459.640	100.000%	2464.097
kg de finos por m <sup>3</sup>	514.247		514.722	
Rel. A/(C+CV)	0.5		0.5	
Rel. CV/(C+CV)	20.00%		25.00%	
Relación Grava-Arena	55%	45%	55%	45%
Observaciones	La consistencia es la deseada, pero la fluidez no es la deseada. La mezcla tiene una buena cohesión.		La mezcla tuvo un mejor comportamiento en la fluidez pero la cohesión no era la más adecuada.	
Consistencia	Adecuada		Adecuada	
Revenimiento	24.00 cm		27.00 cm	
Slump Flow	57.00 cm		61.00 cm	
Embudo Tipo V	No se realizó		24 s	

Material	Mezcla 11		Mezcla 12	
	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg	% de un m <sup>3</sup>	Masa en Kg
Grava	39.73%	1106.986	40.49%	1128.030
Arena	33.85%	890.186	33.13%	871.254
Cemento	7.50%	236.842	7.50%	236.842
Ceniza Volante	1.87%	78.947	1.87%	78.947
Agua	15.00%	150.000	15.00%	150.000
Aire	1.60%	0.000	1.60%	0.000
Rhomoac UW450	3.0 ml/kg cemento	0.711 litros	1.5 ml/kg cemento	0.355 litros
Rheobuild 3000	16.0 ml/kg cemento	3.789 litros	16.0 ml/kg cemento	3.789 litros
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros	0.0 ml/kg cemento	0.000 litros
Total	100.000%	2462.961	100.000%	2465.074
kg de finos por m <sup>3</sup>	533.564		528.933	
Rel. A/(C+CV)	0.475		0.475	
Rel. CV/(C+CV)	25.00%		25.00%	
Relación Grava-Arena	54%	46%	55%	45%
Observaciones	Mejoró significativamente la cohesión, la fluidez sigue siendo muy buena y cumple en los límites de un concreto autocompactable.		Esta mezcla cumple con los requerimientos de un concreto autocompactable y por tanto será la mezcla muestra para utilizarla en las comparaciones futuras.	
Consistencia	Adecuada		Adecuada	
Revenimiento	27.00 cm		27.50 cm	
Slump Flow	62.00 cm		63.00 cm	
Embudo Tipo V	20 s		15 s	

### III.VI.III. RESULTADOS DE LAS MEZCLAS AUTOCOMPACTABLES.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los cilindros preparados con las proporciones de la Mezcla 10 cuya proporción aparece en la primera tabla, las características de los cilindros a los que se les realizaron las pruebas aparecen a continuación. Debajo de esta tabla se encuentra una tabla con un resumen de los pesos volumétricos, cargas y esfuerzos soportados por los cilindros antes mencionados.

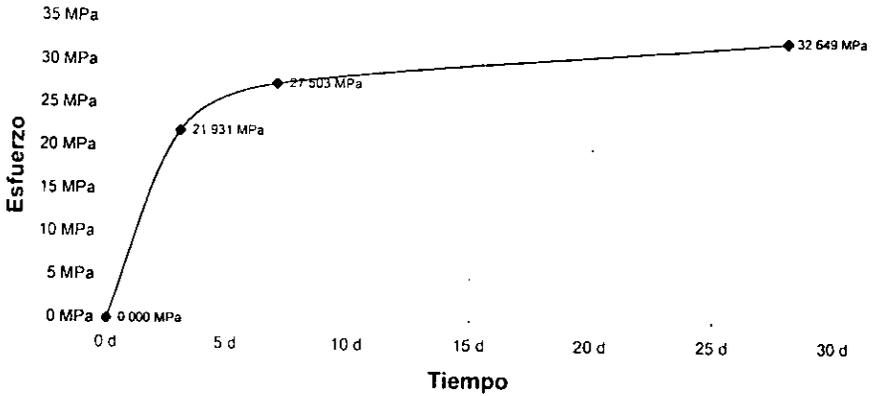
Después de las tablas se muestran dos gráficos, en el primero la finalidad es mostrar el comportamiento del desarrollo de resistencia de los cilindros en el tiempo. La otra gráfica tiene como finalidad mostrar la diferencia de peso volumétrico calculado y el obtenido en los dos tipos de cilindros realizados.

Mezcla 10	Masa en Kg
Grava	1136.387
Arena	877.709
Cemento	225.000
Ceniza Volante	75.000
Agua	150.000
Aire	0.000
Rhoemoac UW450	1.0 ml/kg cemento
Rheobuild 3000	14.0 ml/kg cemento
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento

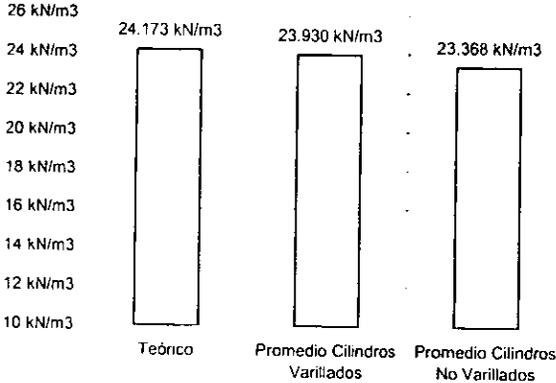
	Altura	Diámetro	Volumen	Masa
Prueba 3 d, sin varillar	299 mm	150 mm	0.00528 m <sup>3</sup>	12.750 kg
	300 mm	151 mm	0.00537 m <sup>3</sup>	12.500 kg
Prueba 7 d, sin varillar	298 mm	151 mm	0.00534 m <sup>3</sup>	12.756 kg
	301 mm	149 mm	0.00525 m <sup>3</sup>	12.150 kg
Prueba 28 d, sin varillar	300 mm	150 mm	0.00530 m <sup>3</sup>	12.850 kg
	301 mm	148 mm	0.00518 m <sup>3</sup>	12.550 kg
Prueba 28 d, varillado	299 mm	150 mm	0.00528 m <sup>3</sup>	12.950 kg
	300 mm	149 mm	0.00523 m <sup>3</sup>	12.700 kg

	Peso Volumétrico	Peso Volumétrico Calculado	Carga	Esfuerzo f <sub>c</sub>
Prueba 3 d, sin varillar	24.173 kN/m <sup>3</sup>	23.672 kN/m <sup>3</sup>	366109 N	20.718 MPa
	24.173 kN/m <sup>3</sup>	22.825 kN/m <sup>3</sup>	414473 N	23.145 MPa
Prueba 7 d, sin varillar	24.173 kN/m <sup>3</sup>	23.449 kN/m <sup>3</sup>	454890 N	25.402 MPa
	24.173 kN/m <sup>3</sup>	22.710 kN/m <sup>3</sup>	516202 N	29.604 MPa
Prueba 28 d, sin varillar	24.173 kN/m <sup>3</sup>	23.778 kN/m <sup>3</sup>	570059 N	32.259 MPa
	24.173 kN/m <sup>3</sup>	23.776 kN/m <sup>3</sup>	568391 N	33.040 MPa
Prueba 28 d, varillado	24.173 kN/m <sup>3</sup>	24.043 kN/m <sup>3</sup>	573983 N	32.481 MPa
	24.173 kN/m <sup>3</sup>	23.817 kN/m <sup>3</sup>	572217 N	32.817 MPa

## Grafica de Esfuerzo vs. Tiempo Mezcla 10



## Peso Volumétrico



Es importante remarcar que el comportamiento del desarrollo de resistencia es muy semejante al presentado por un concreto normal. En el segundo gráfico se puede apreciar que la diferencia que existe entre el peso volumétrico calculado, el peso volumétrico presentado por los cilindros varillados y el peso volumétrico presentado por los cilindros no varillados es muy semejante, y la diferencia es menor al cuatro por ciento, con lo que se asegura tener un concreto que tendrá un buen desempeño al ser colocado con un vibrado mínimo o sin vibrado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los cilindros preparados con las proporciones de la Mezcla 11 cuya proporción aparece en la primera tabla, las características de los cilindros a los que se les realizaron las pruebas aparecen a continuación. Debajo de esta tabla se encuentra una tabla con un resumen de los pesos volumétricos, cargas y esfuerzos soportados por los cilindros antes mencionados.

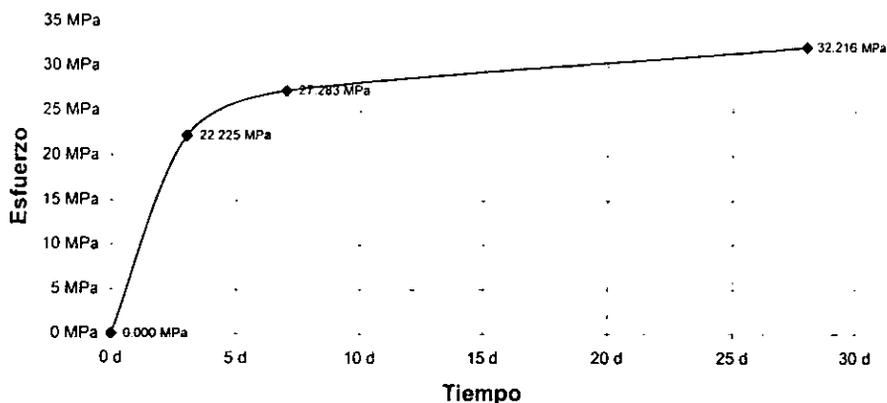
Después de las tablas se muestran dos gráficos, en el primero la finalidad es mostrar el comportamiento del desarrollo de resistencia de los cilindros en el tiempo. La otra gráfica tiene como finalidad mostrar la diferencia de peso volumétrico calculado y el obtenido en los dos tipos de cilindros realizados.

Mezcla 11	Masa en Kg
Grava	1106.986
Arena	890.186
Cemento	236.842
Ceniza Volante	78.947
Agua	150.000
Aire	0.000
Rhoemoac UW450	3.0 ml/kg cemento
Rheobuild 3000	16.0 ml/kg cemento
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento

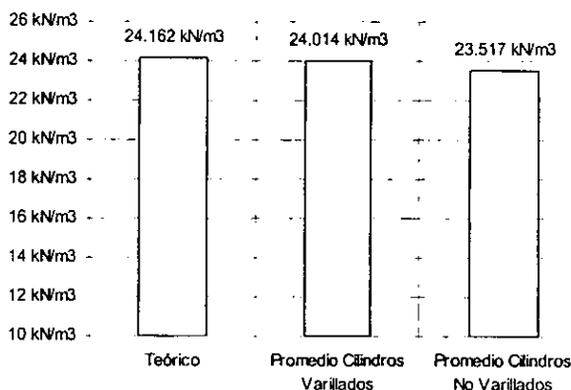
	Altura	Diámetro	Volumen	Masa
Prueba 3 d, sin varillar	298 mm	149 mm	0.00520 m <sup>3</sup>	12.750 kg
	299 mm	150 mm	0.00528 m <sup>3</sup>	12.550 kg
Prueba 7 d, sin varillar	301 mm	150 mm	0.00532 m <sup>3</sup>	12.750 kg
	299 mm	151 mm	0.00535 m <sup>3</sup>	12.550 kg
Prueba 28 d, sin varillar	302 mm	149 mm	0.00527 m <sup>3</sup>	12.850 kg
	300 mm	151 mm	0.00537 m <sup>3</sup>	12.750 kg
Prueba 28 d, varillado	299 mm	148 mm	0.00514 m <sup>3</sup>	12.950 kg
	301 mm	150 mm	0.00532 m <sup>3</sup>	12.650 kg

	Peso Volumétrico	Peso Volumétrico Calculado	Carga	Esfuerzo fc
Prueba 3 d, sin varillar	24.162 kN/m <sup>3</sup>	24.071 kN/m <sup>3</sup>	366109 N	20.997 MPa
	24.162 kN/m <sup>3</sup>	23.301 kN/m <sup>3</sup>	414473 N	23.454 MPa
Prueba 7 d, sin varillar	24.162 kN/m <sup>3</sup>	23.515 kN/m <sup>3</sup>	454890 N	25.741 MPa
	24.162 kN/m <sup>3</sup>	22.993 kN/m <sup>3</sup>	516202 N	28.825 MPa
Prueba 28 d, sin varillar	24.162 kN/m <sup>3</sup>	23.939 kN/m <sup>3</sup>	570059 N	32.693 MPa
	24.162 kN/m <sup>3</sup>	23.282 kN/m <sup>3</sup>	568391 N	31.740 MPa
Prueba 28 d, varillado	24.162 kN/m <sup>3</sup>	24.698 kN/m <sup>3</sup>	573983 N	33.365 MPa
	24.162 kN/m <sup>3</sup>	23.330 kN/m <sup>3</sup>	572217 N	32.381 MPa

## Grafica de Esfuerzo vs. Tiempo Mezcla 11



## Peso Volumétrico



En esta mezcla el comportamiento del desarrollo de resistencia es muy semejante al presentado por un concreto normal. En el segundo gráfico se puede apreciar que la diferencia que existe entre el peso volumétrico calculado, el peso volumétrico presentado por los cilindros varillados y el peso volumétrico presentado por los cilindros no varillados es muy semejante, y la diferencia es menor a la diferencia presentada por la mezcla anterior (3 por ciento), con lo que se asegura tener un concreto que tendrá un buen desempeño al ser colocado con un vibrado mínimo o sin vibrado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los cilindros preparados con las proporciones de la Mezcla 12 cuya proporción aparece en la primera tabla, las características de los cilindros a los que se les realizaron las pruebas aparecen a continuación. Debajo de esta tabla se encuentra una tabla con un resumen de los pesos volumétricos, cargas y esfuerzos soportados por los cilindros antes mencionados.

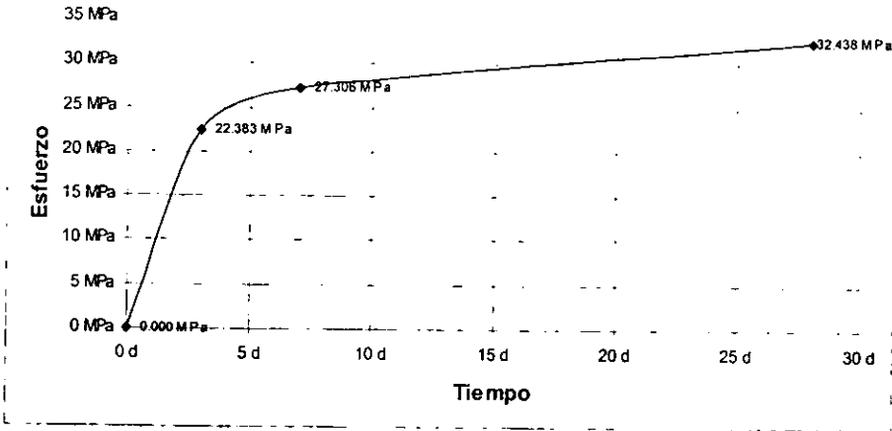
Después de las tablas se muestran dos gráficos, en el primero la finalidad es mostrar el comportamiento del desarrollo de resistencia de los cilindros en el tiempo. La otra gráfica tiene como finalidad mostrar la diferencia de peso volumétrico calculado y el obtenido en los dos tipos de cilindros realizados.

Mezcla 12	Masa en Kg
Grava	1128.030
Arena	871.254
Cemento	236.842
Ceniza Volante	78.947
Agua	150.000
Aire	0.000
Rhoemoac UW450	1.5 ml/kg cemento
Rheobuild 3000	16.0 ml/kg cemento
Eucon 37	0.0 ml/kg cemento

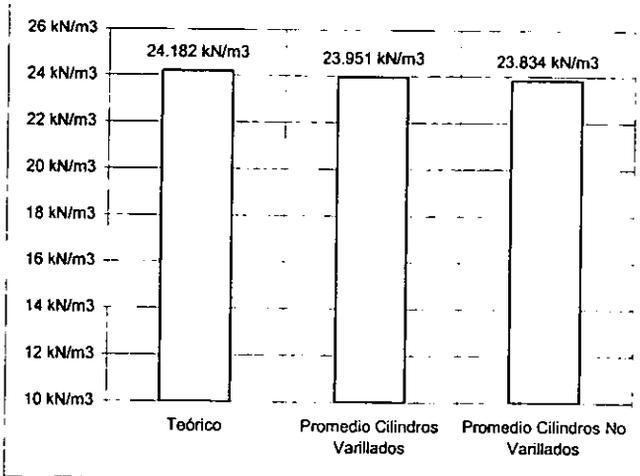
	Altura	Diámetro	Volumen	Masa
Prueba 3 d, sin varillar	301 mm	149 mm	0.00525 m <sup>3</sup>	12.700 kg
	299 mm	149 mm	0.00521 m <sup>3</sup>	12.850 kg
Prueba 7 d, sin varillar	299 mm	151 mm	0.00535 m <sup>3</sup>	12.750 kg
	300 mm	150 mm	0.00530 m <sup>3</sup>	12.950 kg
Prueba 28 d, sin varillar	300 mm	148 mm	0.00516 m <sup>3</sup>	12.700 kg
	298 mm	151 mm	0.00534 m <sup>3</sup>	12.850 kg
Prueba 28 d, varillado	301 mm	150 mm	0.00532 m <sup>3</sup>	12.950 kg
	301 mm	149 mm	0.00525 m <sup>3</sup>	12.850 kg

	Peso Volumétrico	Peso Volumétrico Calculado	Carga	Esfuerzo Fc
Prueba 3 d, sin varillar	24.182 kN/m <sup>3</sup>	23.738 kN/m <sup>3</sup>	366109 N	20.997 MPa
	24.182 kN/m <sup>3</sup>	24.179 kN/m <sup>3</sup>	414473 N	23.770 MPa
Prueba 7 d, sin varillar	24.182 kN/m <sup>3</sup>	23.360 kN/m <sup>3</sup>	454890 N	25.402 MPa
	24.182 kN/m <sup>3</sup>	23.963 kN/m <sup>3</sup>	516202 N	29.211 MPa
Prueba 28 d, sin varillar	24.182 kN/m <sup>3</sup>	24.140 kN/m <sup>3</sup>	570059 N	33.136 MPa
	24.182 kN/m <sup>3</sup>	23.622 kN/m <sup>3</sup>	568391 N	31.740 MPa
Prueba 28 d, varillado	24.182 kN/m <sup>3</sup>	23.884 kN/m <sup>3</sup>	573983 N	32.481 MPa
	24.182 kN/m <sup>3</sup>	24.018 kN/m <sup>3</sup>	572217 N	32.817 MPa

## Grafica de Esfuerzo vs. Tiempo Mezcla 12



## Peso Volumétrico



En la mezcla que tuvo la calidad de autocompactable se puede observar que el desarrollo de resistencia es muy similar al presentado por un concreto normal. En cuestión del peso volumétrico es evidente que al mejorar las características autocompactables de la mezcla la diferencia entre los pesos volumétricos disminuyó hasta un 2% respecto del teórico para el caso en que no se varilló. De esta forma queda comprobado que este es un concreto que tendrá un buen desempeño al ser colocado en obra aún sin que se le añada energía de vibrado.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE COSTOS.

En este capítulo realizaré una comparación entre los costos que se generan al elaborar los concretos normales y los autocompactables debido a los materiales constitutivos, colocación y otros costos diversos derivados de la utilización de ambos tipos de concreto. Esta comparación es con la finalidad de poder observar donde se presentan las ventajas y desventajas, tanto técnicas como de costos, de un tipo de concreto respecto del otro.

#### IV.I. SIMILITUDES Y DIFERENCIAS GENERALES.

El cuadro que se muestra a continuación expresa las principales cualidades de los concretos normales y los concretos autocompactables, para poder identificar sus principales similitudes y diferencias que tienen entre sí. Al tener identificadas estas características se puede identificar más fácil las posibles ventajas en costos de estos dos tipos de concreto para confirmarlo en un futuro análisis.

Concepto	Concretos Normales	Concretos Autocompactables.
<b>Aplicaciones</b>	Amplia	Muy Amplia
<b>Resistencia</b>	La deseada	La deseada
<b>Revenimiento</b>	Entre 5 y 15 cm	Mayor a 20 cm
<b>Ventajas Técnicas</b>	Ampliamente conocido, de uso común, las pruebas para evaluar su calidad están estandarizadas.	Es un producto que garantiza plenamente sus características y por tal motivo genera un producto con una mejor calidad final.
<b>Entrega y Recomendaciones</b>	Se puede hacer en obra sin mayores problemas.	Por sus características, se debe tener un estricto control de las cantidades de los materiales a emplear. Requieren un mayor control en el diseño y control de la mezcla.

#### IV.II. CARACTERÍSTICAS DE MEZCLAS TIPO CON RESISTENCIA DE $f'c = 30 \text{ MPa}$ .

Con base en la experiencia recopilada del trabajo en laboratorio, en esta tabla presento dos proporcionamientos diferentes de mezclas de concreto que tienen un comportamiento de acuerdo a los dos tipos de concreto que quiero comparar. Este apartado muestra los cambios en las proporciones de los materiales usados comúnmente en las dos mezclas y de esta forma se puede identificar las diferencias importantes en el proporcionamiento de los materiales de un tipo de concreto al otro y poder identificar donde se presentarán las principales diferencias de costos.

Característica	Concretos Normales	Concretos Autocompactables
Revenimiento	10 cm	27 cm
Cemento	350 kg/m <sup>3</sup>	237 kg/m <sup>3</sup>
Grava	1300 kg/m <sup>3</sup>	1128 kg/m <sup>3</sup>
Arena	866 kg/m <sup>3</sup>	871 kg/m <sup>3</sup>
Agua	150 kg/m <sup>3</sup>	150 kg/m <sup>3</sup>
Ceniza Volante Clase F	0 kg/m <sup>3</sup>	79 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Reductor de Agua Rango Medio (RA-200)	6.0 l/m <sup>3</sup>	0.0 l/m <sup>3</sup>
Aditivo Antideslave (Rheomac UW450)	0 l/m <sup>3</sup>	0.36 l/m <sup>3</sup>
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango (Rheobuild 3000)	0 l/m <sup>3</sup>	3.79 l/m <sup>3</sup>

Los rubros de materiales que sufren los cambios más drásticos son los cementantes y los aditivos, por el otro lado las cantidades de agregados y agua son muy semejantes entre sí.

#### IV.III. PERSONAL, EQUIPO Y TIEMPO APROXIMADO REQUERIDO PARA LA COLOCACIÓN Y TERMINADOS, POR METRO CÚBICO.

En el apartado anterior se presentaban los principales cambios en las proporciones de materiales, en este apartado se presentan las principales diferencias que se obtienen en la utilización e implementación en obra de los concretos a comparar.

Concepto	Concretos Normales	Concretos Autocompactables
Obreros Requeridos para Colocación de un metro cúbico	12 obreros	4 obreros
Oficiales Requeridos para la Colocación de un metro cúbico	2 obreros	1 obreros
Vibradores Requeridos por Metro Cúbico de Concreto	2 vibrador	1 vibrador
Tamaño del Vibrador	Grande	Pequeño
Tiempo de Colocación por Metro Cúbico de Concreto	20 minutos	6 minutos
Cantidad de Metros Cúbicos Colocables por Día con el Personal	65 m <sup>3</sup> /Jornada	90 m <sup>3</sup> /Jornada
Dispositivos de Seguridad	12	4
Personal Requerido para Hacer las Reparaciones por Malos Terminados	2 obreros	1 obreros
Material Requerido para Hacer las Reparaciones por Malos Terminados	10 kg Cemento/m <sup>3</sup>	4 kg Cemento/m <sup>3</sup>
Rendimiento	65 m <sup>3</sup> /Jornada	90 m <sup>3</sup> /Jornada

#### IV.IV. COSTOS DE LOS MATERIALES, APARATOS Y PERSONAL.

En esta tabla se encuentran los costos que tienen los equipos y el personal con los cuales compararé las mezclas de concreto que se están comparando. Para hacer más ilustrativa esta comparación, parto del hecho que los materiales empleados son los mismos a excepción de los aditivos y que la diferencia principal se encuentra en las proporciones de la mezcla como se especifican en el inciso IV.II.

Material	Unidad	Precio
Cemento	ton	1470.00 pesos por unidad
Grava	ton	135.00 pesos por unidad
Arena	ton	135.00 pesos por unidad
Agua	litro	0.15 pesos por unidad
Ceniza volante clase F	ton	735.00 pesos por unidad
Aditivo Reductor de Agua Rango Medio (RA-200)	litro	30.00 pesos por unidad
Aditivo Antideslave (Rheomac UW450)	litro	215.60 pesos por unidad
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango (Rheobuild 3000)	litro	68.60 pesos por unidad
Sueldo de obrero por día	Jornada	65.00 pesos por jornada
Sueldo de oficial por día	Jornada	85.00 pesos por jornada
Renta de vibrador por día	Equipo	250.00 pesos por unidad
Equipo de seguridad	Equipo	85.00 pesos por unidad

#### IV.V. COMPARATIVO DE COSTOS DE CONCRETO NORMAL Y CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

En este inciso haré el comparativo asociado a los costos que se generarían al realizar las mezclas antes especificadas con los precios del inciso anterior. Para lograr el comparativo parto de suponer que los costos que se presentan por el mezclado, proporcionamiento en ambos casos es el mismo, de igual manera propongo en este modelo que el costo de diseño de mezcla es el mismo. En la tabla que a continuación se muestra, se encuentran los costos que se presentan por concepto de materiales al elaborar los concretos normales y los concretos autocompactables (actualizados a enero de 2001).

Conceptos de Materiales	Concretos Normales	Concretos Autocompactables.
Cemento	\$ 514.50	\$ 348.16
Grava	\$ 175.50	\$ 152.28
Arena	\$ 116.91	\$ 117.62
Agua	\$ 22.50	\$ 22.50
Ceniza Volante Clase F	\$ -	\$ 58.03
Aditivo Reductor de Agua Rango Medio (RA-200)	\$ 180.00	\$ -
Aditivo Antideslave (Rheomac UW450)	\$ -	\$ 76.59
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango (Rheobuild 3000)	\$ -	\$ 259.96
<b>Costo Parcial</b>	<b>\$ 1,009.41</b>	<b>\$ 1,035.14</b>

En la siguiente tabla se muestran los costos que se relacionan a los conceptos de colocación y terminar la superficie tanto de los concretos normales, como de los concretos autocompactables. Esta tabla se basa en que el concreto se coloca en elementos que no tengan un fácil acceso tanto para su colocación como para su vibrado y que el acabado sea visible.

Conceptos por Colocación y Terminados	Concretos Normales	Concretos Autocompactables
Costos por Personal Requerido para Colocación de un Metro Cúbico	\$ 20.61	\$ 5.41
Vibrado del Concreto por Metro Cúbico	\$ 10.38	\$ 2.78
Dispositivos de Seguridad	\$ 0.05	\$ 0.01
Costos por Reparaciones por Metro Cúbico	\$ 14.74	\$ 5.89
<b>Costo Parcial</b>	<b>\$ 45.79</b>	<b>\$ 14.09</b>

En la tabla que a continuación se muestra se encuentra el costo integrado para los dos tipos de concreto en estudio por los conceptos de materiales, colocación y terminados.

Concepto	Concretos Normales	Concretos Autocompactables.
Costos integrados de los conceptos	\$ 1,055.20	\$ 1,049.23
Reducción de tiempo en la colocación y acabado por metro cúbico	0 minutos	28 minutos
Reducción de costos por metro cúbico de concreto utilizado	\$ 0.00	\$ 5.97

La diferencia que se obtiene indica que el concreto autocompactable es viable para su uso comercial, aunado a lo anterior, la cantidad de dinero que se ahorra por metro cúbico es considerable y hace atractivo el cambio a esta nueva tecnología a pesar de los retos y dificultades que se puedan presentar. Esto es de especial importancia para obras que tengan un requerimiento elevado de concreto ya que a mayor volumen el ahorro marginal se puede transformar en un ahorro de grandes dimensiones.

## CAPÍTULO V

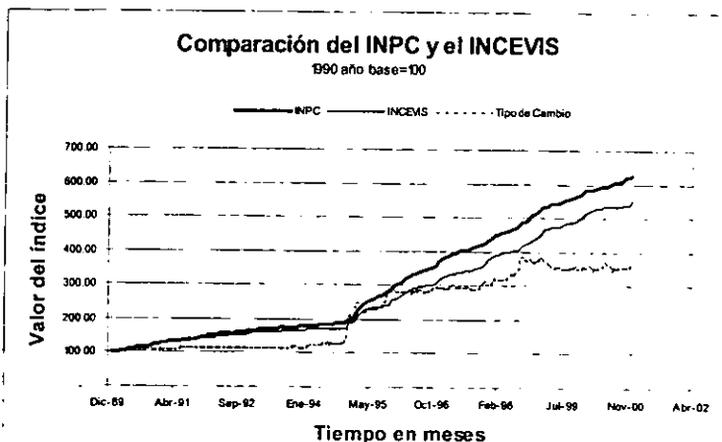
### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

En este capítulo, realizaré una comparación del desempeño económico que tienen los diferentes componentes de cada uno de los concretos a las variaciones económicas que se presentan a través del tiempo; con el fin de poder identificar los materiales o actividades que ofrecen mayor riesgo económico dadas las propiedades de cada uno de los concretos en estudio. La manera que considero mas apropiada para lograr este acercamiento es utilizar el índice nacional de precios al consumidor, el índice nacional del costo de edificación de la vivienda de interés social y el tipo de cambio entre el peso y los dólares americanos, dado que en ellos podemos encontrar información de la variación de los productos que se utilizan para la realización de ambos tipos de concreto durante un periodo de tiempo considerable.

El periodo de tiempo que se utilizará para hacer el estudio del comportamiento comprende desde el inicio de 1990 hasta diciembre del año 2000. La tecnología necesaria para hacer los concretos autocompactables comenzaba a existir en esta década y por tal motivo el análisis no se realiza en un periodo de tiempo más extenso, ya que no tendría sentido hacerlo. En el modelo que a continuación presento tiene como base el comportamiento histórico del precio de varios productos y el tipo de cambio entre dos monedas, por lo cual primero hablaré del comportamiento de estos índices en el tiempo, para poder observar si existen relaciones entre ellos y de esta manera poder identificar ciclos para realizar análisis a futuro.

### V.I. ANÁLISIS DE LOS INDICADORES DEL COMPORTAMIENTO ECONÓMICO DEL CONCRETO A TRAVÉS DEL TIEMPO.

La siguiente gráfica muestra la variación de los índices nacional de precios al consumidor y el índice nacional del costo de edificación de vivienda de Interés social, con 1990 como año base (indicador=100), para que fuera comparable. Además, añadí una tendencia que refleja el comportamiento del tipo de cambio a manera de índice para poderlo comparar de manera similar con los otros dos índices.

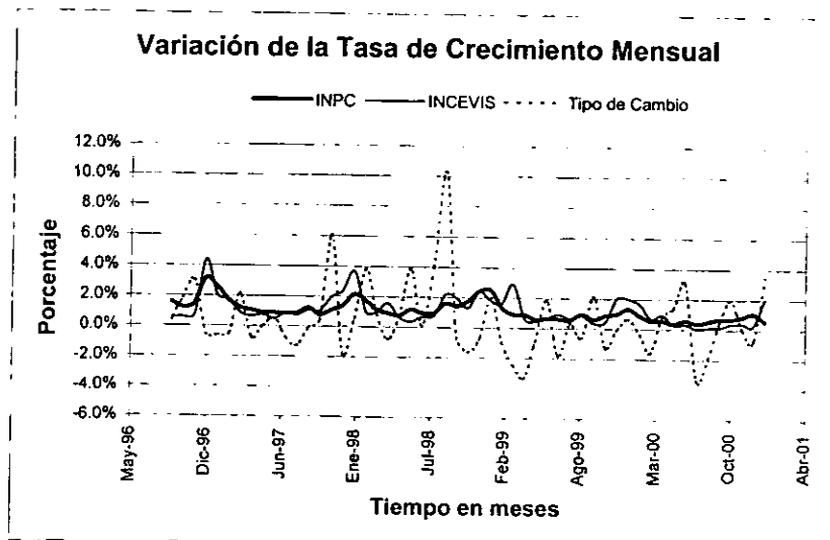


De la gráfica anterior se puede observar que en los últimos diez años el comportamiento del INPC y el INCEVIS ha sido bastante similar, pero durante el año de 95 existió una diferencia en su crecimiento que se ha mantenido casi constante. Aquí se muestra que el crecimiento que ha tenido el INPC ha sido superior al INCEVIS y a la variación del tipo de cambio.<sup>1</sup>

El cambio más importante en la pendiente de los tres índices se presentó entre fines de diciembre de 1994 y el primer trimestre de 1995, pero en el periodo cercano a septiembre de 1998 el tipo de cambio tiene un cambio fuerte pero que parece no afectar a las otras dos tendencias, pero después de este cambio el índice permanece estable.

Lo anterior nos da la pauta para pensar que en este período será favorable para los concretos autocompactables, ya que los precios de los aditivos para concreto tienen un comportamiento directamente relacionado con el tipo de cambio, de manera semejante podemos observar que el periodo del primer trimestre de 1995 no será favorable para los concretos autocompactables. Para análisis a futuro podemos considerar un crecimiento estable tanto del INPC como del INCEVIS. El comportamiento del índice del tipo de cambio no nos indica una tendencia tan marcada como en los dos casos anteriores y más bien sugiere que el comportamiento no es tan predecible, pero se puede pensar en que a corto plazo seguirá con la tendencia desarrollada durante los últimos dos años.

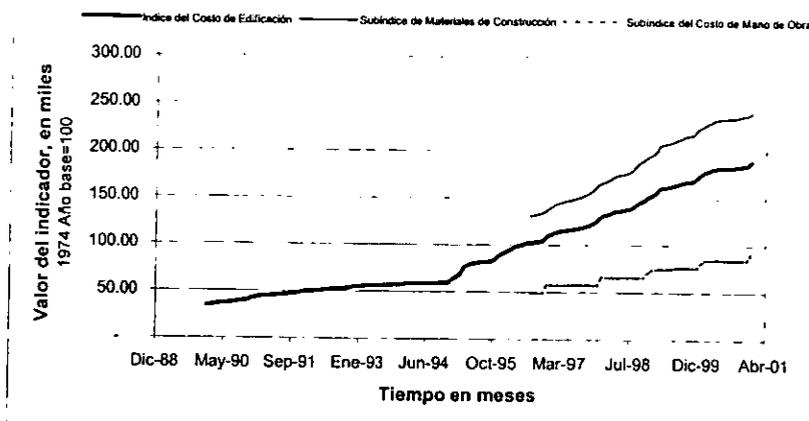
Dada la caracterización anterior en la siguiente gráfica se encuentran las variaciones de las tasas de cambio mensuales del INPC, INCEVIS y del Tipo de Cambio. En esta gráfica se puede observar que la tasa de crecimiento tanto del INPC y el INCEVIS son semejantes y se mantienen casi constantes en un valor cercano al 1.2% mensual durante los últimos cuatro años. Por otro lado, la tasa de crecimiento del tipo de cambio no es tan estable y tiene variaciones importantes para un periodo de tiempo de estudio bastante corto (cuatro años), lo cual indica que para poder caracterizar este índice es mucho más difícil, pero a pesar de todos los sobresaltos el promedio del valor de esta tasa en el periodo estudiado es cercano al 0.5% mensual, lo cual nos puede servir para proyecciones a futuro durante el próximo año.



<sup>1</sup> Los valores de los índices fue obtenida de la página de internet del Banco de México

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de dos grandes subíndices que contiene el INCEVIS, respecto del comportamiento que tiene el INCEVIS para poder tener una percepción del comportamiento de sus componentes y así poder observar la conveniencia de tener un análisis más detallado o no, dependiendo de las tendencias presentadas. De esta forma podrá saber que tan bien refleja este índice el cambio real de los precios de los insumos que se utilizan para elaborar concreto del tipo que sea.

### Comportamiento del INCEVIS



Con la información que se obtiene en la gráfica se puede observar que la componente que refleja el comportamiento de la mano de obra tiene un menor impacto en la conformación del INCEVIS que la componente de materiales. Esta tendencia es similar en la división de las diferentes ramas que conforman los subíndices, aunque la rama que se dedica a conceptos de albañilería tiene cambios mayores a los presentados por los subíndices mencionados con anterioridad.

## V.II. INDICADORES DE VARIACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO A TRAVÉS DEL TIEMPO.

A continuación se encuentran los valores por mes de los índices antes descritos obtenidos del Banco de México, con el fin de tener una base numérica para hacer el análisis correspondiente del costo de realizar los diferentes tipos de concretos propuestos en el periodo de tiempo en estudio.

### V.II.I. INDICE NACIONAL DE PRECIOS AL CONSUMIDOR. <sup>2</sup>

El índice que se muestra, esta basado en los datos publicados por el Banco de México y tiene al año de 1994 como base 100. Los valores presentados corresponden a los valores

<sup>2</sup>Fuente: Banco de México

mensuales del índice referido en el título, presentado por cada año, desde enero de 1990 hasta enero de 2001.

Fecha	Ene 90	Feb 90	Mar 90	Abr 90	May 90	Jun 90	Jul 90	Ago 90	Sep 90	Oct 90	Nov 90	Dic 90
Valor del índice en el periodo indicado	54.181	55.408	56.385	57.243	58.242	59.525	60.611	61.643	62.522	63.421	65.105	67.157
Fecha	Ene 91	Feb 91	Mar 91	Abr 91	May 91	Jun 91	Jul 91	Ago 91	Sep 91	Oct 91	Nov 91	Dic 91
Valor del índice en el periodo indicado	68.869	70.071	71.070	71.814	72.516	73.278	73.925	74.439	75.181	76.056	77.944	79.779
Fecha	Ene 92	Feb 92	Mar 92	Abr 92	May 92	Jun 92	Jul 92	Ago 92	Sep 92	Oct 92	Nov 92	Dic 92
Valor del índice en el periodo indicado	81.23	82.19	83.03	83.77	84.32	84.89	85.43	85.95	86.70	87.32	88.05	89.30
Fecha	Ene 93	Feb 93	Mar 93	Abr 93	May 93	Jun 93	Jul 93	Ago 93	Sep 93	Oct 93	Nov 93	Dic 93
Valor del índice en el periodo indicado	90.42	91.16	91.69	92.22	92.75	93.27	93.72	94.22	94.92	95.30	95.73	96.45
Fecha	Ene 94	Feb 94	Mar 94	Abr 94	May 94	Jun 94	Jul 94	Ago 94	Sep 94	Oct 94	Nov 94	Dic 94
Valor del índice en el periodo indicado	97.20	97.70	98.21	98.69	99.16	99.66	100.1	100.57	101.28	101.81	102.36	103.26
Fecha	Ene 95	Feb 95	Mar 95	Abr 95	May 95	Jun 95	Jul 95	Ago 95	Sep 95	Oct 95	Nov 95	Dic 95
Valor del índice en el periodo indicado	107.14	111.68	118.27	127.69	133.029	137.251	140.049	142.372	145.317	148.307	151.964	156.915
Fecha	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Valor del índice en el periodo indicado	162.556	166.35	170.012	174.845	178.032	180.931	183.503	185.942	188.915	191.273	194.171	200.388
Fecha	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
Valor del índice en el periodo indicado	205.541	208.995	211.596	213.882	215.834	217.749	219.646	221.599	224.359	226.152	228.682	231.886
Fecha	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
Valor del índice en el periodo indicado	236.931	241.079	243.903	246.185	248.146	251.079	253.500	255.937	260.088	263.815	268.487	275.038
Fecha	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Valor del índice en el periodo indicado	281.984	285.773	288.428	291.075	292.826	294.750	296.698	298.368	301.251	303.159	305.855	308.919
Fecha	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Valor del índice en el periodo indicado	313.067	315.844	317.595	319.402	320.596	322.495	323.753	325.53	327.91	330.17	332.99	336.6
Fecha	Ene 01											
Valor del índice en el periodo indicado	338.46											

## V.II.II. INDICE NACIONAL DEL COSTO DE EDIFICACION DE LA VIVIENDA DE INTERES SOCIAL.<sup>3</sup>

En esta parte del capítulo se presenta el índice que refleja el cambio en los costos de la construcción de la vivienda de interés social, al comparar los precios de estos productos entre diferentes periodos.

Este índice tiene varios subíndices que competen a los conceptos que se requieren para hacer una vivienda, de tal manera que este índice refleja de manera muy cercana a la realidad cualquier variación en el área de edificación. Los valores presentados corresponden a los publicados por el Banco de México.

<sup>3</sup> Fuente: Banco de México.

Para el análisis propuesto cuento con los datos históricos de este índice desde enero de 1990 hasta enero de 2001, la información de los subíndices esta desde agosto de 1996 hasta enero de 2001, y la información de los conceptos que conforman los subíndices se encuentra desde febrero de 1998 hasta enero de 2001.

Debido a la falta de información el periodo de análisis en algunos de los análisis se restringe un poco, pero no de una manera que afecte los resultados que se obtendrán en los análisis que se realizarán en este capítulo.

Fecha	Ene 90	Feb 90	Mar 90	Abr 90	May 90	Jun 90	Jul 90	Ago 90	Sep 90	Oct 90	Nov 90	Dic 90
INCEVIS	34413.2	34882.6	35295.6	36146.6	36701.5	37111	37429.7	37993.3	39060.6	39378.8	40291.2	42060.8
Fecha	Ene 91	Feb 91	Mar 91	Abr 91	May 91	Jun 91	Jul 91	Ago 91	Sep 91	Oct 91	Nov 91	Dic 91
INCEVIS	43146.6	43898.2	44454.1	44799.3	45190.8	45496.6	45869.7	46383.5	46762	47201.3	47640.4	48761.7
Fecha	Ene 92	Feb 92	Mar 92	Abr 92	May 92	Jun 92	Jul 92	Ago 92	Sep 92	Oct 92	Nov 92	Dic 92
INCEVIS	49487.5	49920.7	50153.9	50447.5	50905	51543.7	51947.2	52252	52857.2	52520.3	53389.6	53754
Fecha	Ene 93	Feb 93	Mar 93	Abr 93	May 93	Jun 93	Jul 93	Ago 93	Sep 93	Oct 93	Nov 93	Dic 93
INCEVIS	55047.4	55303	55575.6	55814.4	56042.8	56226.2	56420.9	56599.4	56792.7	56890.2	57005.7	57148.9
Fecha	Ene 94	Feb 94	Mar 94	Abr 94	May 94	Jun 94	Jul 94	Ago 94	Sep 94	Oct 94	Nov 94	Dic 94
INCEVIS	57954.3	58102.1	58264	58368	58506	58652.9	58803.7	58913.7	59014.2	59175.1	59361.8	59804.2
Fecha	Ene 95	Feb 95	Mar 95	Abr 95	May 95	Jun 95	Jul 95	Ago 95	Sep 95	Oct 95	Nov 95	Dic 95
INCEVIS	63713.8	65923.7	68769.4	75750.5	78337.5	80054.4	80826	81383	81815.3	82360.6	83423	87071.5

INCEVIS	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Subíndice de Materiales de Construcción	90073.4	92552.7	94750.9	97781.1	99192	100187	101861	102617	103229	103833	104576	109172
1.-Albañilería	-	-	-	-	-	-	-	131057	131995	132921	134061	136856
Subíndice del Costo de Mano de Obra	-	-	-	-	-	-	-	146251	146969	147487	148039	151515
1.-Albañilería	-	-	-	-	-	-	-	48945.9	48946.4	48946.4	48946.4	56850.1
	-	-	-	-	-	-	-	50248.4	50248.5	50248.6	58363	58942.6

Fecha	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
INCEVIS	111375	113387	114412	115183	116065	116682	117728	118629	119935	121214	123593	126513
Subíndice de Materiales de Construcción												
1.-Albañilería	139931	143018	144590	145773	147125	148072	149676	151058	153061	155023	158673	163152
Subíndice del Costo de Mano de Obra	155184	159564	160399	160512	160897	161644	164334	166710	169141	171849	177344	183722
1.-Albañilería	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6	57414.6
	58942.6	58942.6	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8	58942.8

Fecha	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
INCEVIS	131199	132497	133785	135930	136851	137361	138296	139368	142437	145252	147166	150724
Subíndice de Mat. de Cons.	165829	167819	169795	173086	174498	175281	176716	178359	183067	187385	190320	193520
1.-Albañilería	186384	188391	189915	194595	196228	196616	197487	199591	205958	211038	213610	217133
A.- Cimentación y muros		224626	214987	217655	218572	216586	215170	215340	220091	227564	232970	275204
1.-Arena		217117	211085	209652	205865	207083	209631	210563	210911	218399	230080	282394
3.-Cemento		315727	294033	307118	308217	307782	306020	305925	322589	333446	339736	377096
4.-Grava		224954	219480	215716	211355	208765	211375	214374	215337	219490	229965	276797
C.-Concreto		322456	285490	295380	300709	300078	305814	315640	325587	330785	332601	399853
Subíndice del Costo de Mano de Obra	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	65794.3	69987.5
1.-Albañilería	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	67547.3	71916.1
A.- Cimentación y muros		73456.9	73330.6	73040.9	72893.8	72474.7	71799.3	71712.7	71713.2	71681.7	71656.4	83205.6
C.-Concreto		68999.8	68750.5	68678	68659.9	68240.1	67427.4	67427.4	67429.5	67425.6	67427.9	78128.7

	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Índice del Costo de Edificación	153463	155935	160495	161528	162271	163380	164945	166099	167575	168199	168969	172385
Subíndice de Materiales de Construcción	195851	199074	205965	207459	208536	210021	212061	213802	216069	217019	218191	223428
I.-Albañilería	218821	222411	236042	237652	238185	241087	243582	245705	248628	249598	249898	255895
A.-Cimentación y muros	277846	275189	275184	275182	275204	275194	275202	275205	275202	275193	275184	275204
1.-Arena	287427	282383	282390	282380	282385	282378	282394	282386	282389	282390	282401	282394
3.-Cemento	379015	377104	377127	377110	377103	377095	377109	377114	377107	377127	377107	377096
4.-Grava	281513	276805	276808	276806	276812	276801	276817	276821	276815	276820	276808	276797
C.-Concreto	403914	399878	399885	399856	399853	399884	399883	399853	399853	399853	399853	399853
Subíndice del Costo de Mano de Obra	73463.3	74519.3	74711.6	74880.5	74996.6	75398.3	76067.7	76121.3	76136.5	76144.1	76151.8	76174.6
I.-Albañilería	75466.2	76543.9	76745.4	76956.7	77091.7	77552.5	78305.3	78380.9	78404.4	78427.9	78451.5	78475
A.-Cimentación y muros	88802.5	83204.6	83208.2	83208.2	83208.2	83208.2	83208.2	83208.2	83208.6	83208.1	83207.5	83205.6
C.-Concreto	82966.1	78128.5	78128.1	78128.1	78128.1	78128.1	78128.1	78128.1	78130.5	78126.1	78128.7	78128.7

	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Índice del Costo de Edificación	175824	178712	179964	181680	182239	182834	182963	183225	183517	184200	184947	185464
Subíndice de Materiales de Construcción	225957	228665	230536	233168	233993	234905	235102	235499	235918	236960	238101	238874
I.-Albañilería	259613	262757	264488	268356	269426	269698	270181	270038	270702	272060	273289	273950
A.-Cimentación y muros	277846	282454	286686	297004	298954	300374	301209	301899	302226	302107	303143	303825
1.-Arena	287427	296050	303908	309714	313193	316320	316592	316442	318337	319298	318831	326617
3.-Cemento	379015	385514	390553	417424	417718	416539	416479	415542	414063	408844	405654	406962
4.-Grava	281513	290341	297181	308833	311441	314446	314851	317126	319057	321776	321651	322026
C.-Concreto	403914	403877	404364	404934	405052	405163	405601	406211	406211	406211	406211	406211
Subíndice del Costo de Mano de Obra	81253.8	84451.8	84545	84546.2	84606	84606	84606	84616.8	84670.5	84680.8	84691.1	84725.4
I.-Albañilería	83500.8	86925.1	87072	87074.9	87113.5	87113.5	87113.5	87113.5	87151.1	87171.8	87192.5	87236.9
A.-Cimentación y muros	88802.5	92498.6	92660.7	92660.7	92660.7	92660.7	92660.7	92660.7	92719.6	92743.8	92768	92857.4
C.-Concreto	82966.1	86238.2	86417.5	86417.5	86417.5	86417.5	86417.5	86417.5	86435.8	86454.3	86472.8	86472.8

	Ene 01
Índice del Costo de Edificación	189256
Subíndice de Materiales de Construcción	241467
I.-Albañilería	276361
A.-Cimentación y muros	307519
1.-Arena	329593
3.-Cemento	414339
4.-Grava	322022
C.-Concreto	406863
Subíndice del Costo de Mano de Obra	90714.9
I.-Albañilería	93347.9
A.-Cimentación y muros	99405.5
C.-Concreto	92399.4

### V.III. VALUACIÓN ECONÓMICA EN EL TIEMPO DE LOS DOS TIPOS DE CONCRETO EN ESTUDIO.

La primera parte del estudio comienza con la comparación económica del costo que se presenta por cada uno de los dos tipos de concretos en estudio, de tal forma que se pueda comenzar un estudio del comportamiento económico en el tiempo, de los dos tipos de concreto. Con base en los valores obtenidos en el capítulo anterior se obtuvo la tabla siguiente:

Conceptos de Materiales	Concreto Normal	Concreto Autocompactablee
Cemento	\$ 514.50	\$ 348.16
Grava	\$ 175.50	\$ 152.28
Arena	\$ 116.91	\$ 117.62
Agua	\$ 22.50	\$ 22.50
Ceniza Volante Clase F	\$ -	\$ 58.03
Aditivo Reductor de Agua Rango Medio (RA-200)	\$ 180.00	\$ -
Aditivo Antideslave (Rheomac UW450)	\$ -	\$ 76.59
Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango (Rheobuild 3000)	\$ -	\$ 259.96
Costo Parcial	\$ 1,009.41	\$ 1,035.14
Costos por Personal Requerido para Colocación de un Metro Cúbico	\$ 20.61	\$ 5.41
Vibrado del Concreto por Metro Cúbico	\$ 10.38	\$ 2.78
Dispositivos de Seguridad	\$ 0.05	\$ 0.01
Costos por Reparaciones por Metro Cúbico	\$ 14.74	\$ 5.89
Costo Parcial	\$ 45.79	\$ 14.09
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$ 1,055.20</b>	<b>\$ 1,049.23</b>

Para realizar el análisis económico utilizaré los costos obtenidos en el capítulo anterior y los actualizaré utilizando los valores de los índices descritos en los apartados V.II.I, V.II.II. y V.II.III, para poder hacer las comparaciones a través del tiempo entre los dos tipos de concretos.

#### V.III.I. COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS UTILIZANDO LAS VARIACIONES DEL TIPO DE CAMBIO DE DOLARES VS PESOS MEXICANOS Y EL INPC.<sup>4</sup>

En este apartado se encuentra el precio que tendrían los componentes de los concretos por mes, utilizando el tipo de cambio para los aditivos y el Índice Nacional de Precios al Consumidor para el resto de los conceptos que conforman el costo total. El resultado obtenido en pesos constantes se transforma a pesos constantes de enero de 2001.

Al final del análisis en el periodo de estudio (enero de 1990 a diciembre de 2000) se encuentra un resumen del comportamiento presentado a lo largo de todo el periodo de estudio, un resumen del comportamiento en los últimos dos años y en el último año.

<sup>4</sup> Los valores de los índices y el tipo de cambio fueron obtenidos del Banco de México.

Periodo	Ene 90	Feb 90	Mar 90	Abr 90	May 90	Jun 90	Jul 90	Ago 90	Sep 90	Oct 90	Nov 90	Dic 90
Concreto												
Autocompactable	260.241	261.259	262.269	263.327	264.369	265.298	266.14	266.988	267.835	268.678	299.845	300.299
Concreto Normal	256.056	256.6	257.141	257.707	258.264	258.761	259.211	259.665	260.117	260.569	298.309	298.552
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$ 4.18	-\$ 4.66	-\$ 5.13	-\$ 5.62	-\$ 6.11	-\$ 6.54	-\$ 6.93	-\$ 7.32	-\$ 7.72	-\$ 8.11	-\$ 1.54	-\$ 1.75
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$26.14	-\$28.45	-\$30.78	-\$33.23	-\$35.48	-\$37.17	-\$38.69	-\$40.21	-\$41.78	-\$43.28	-\$ 7.99	-\$ 8.81

Periodo	Ene 91	Feb 91	Mar 91	Abr 91	May 91	Jun 91	Jul 91	Ago 91	Sep 91	Oct 91	Nov 91	Dic 91
Concreto												
Autocompactable	300.724	301.131	301.54	301.96	302.383	302.806	303.222	303.649	304.068	304.488	328.676	328.687
Concreto Normal	298.779	298.997	299.215	299.44	299.666	299.893	300.115	300.343	300.567	300.792	330.321	330.326
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$ 1.95	-\$ 2.13	-\$ 2.32	-\$ 2.52	-\$ 2.72	-\$ 2.91	-\$ 3.11	-\$ 3.31	-\$ 3.50	-\$ 3.70	\$ 1.64	\$ 1.64
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 9.56	-\$10.31	-\$11.07	-\$11.88	-\$12.68	-\$13.46	-\$14.22	-\$15.03	-\$15.76	-\$16.45	\$ 7.14	\$ 6.96

Periodo	Ene 92	Feb 92	Mar 92	Abr 92	May 92	Jun 92	Jul 92	Ago 92	Sep 92	Oct 92	Nov 92	Dic 92
Concreto												
Autocompactable	328.634	328.485	328.56	328.612	329.648	330.353	330.288	329.418	329.248	330.365	330.407	330.354
Concreto Normal	330.298	330.208	330.258	330.287	330.847	331.217	331.183	330.718	330.627	331.224	331.247	331.218
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 1.66	\$ 1.74	\$ 1.70	\$ 1.67	\$ 1.19	\$ 0.86	\$ 0.89	\$ 1.30	\$ 1.38	\$ 0.86	\$ 0.84	\$ 0.86
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	\$ 6.93	\$ 7.18	\$ 6.92	\$ 6.76	\$ 4.79	\$ 3.45	\$ 3.54	\$ 5.12	\$ 5.38	\$ 3.33	\$ 3.23	\$ 3.28

Periodo	Ene 93	Feb 93	Mar 93	Abr 93	May 93	Jun 93	Jul 93	Ago 93	Sep 93	Oct 93	Nov 93	Dic 93
Concreto												
Autocompactable	348.079	347.693	348.014	347.575	348.513	348.47	348.545	348.169	348.169	348.222	349.639	347.997
Concreto Normal	353.179	352.973	353.144	352.909	353.411	353.388	353.428	353.227	353.227	353.256	354.013	353.135
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.10	\$ 5.28	\$ 5.13	\$ 5.33	\$ 4.90	\$ 4.92	\$ 4.88	\$ 5.06	\$ 5.06	\$ 5.03	\$ 4.37	\$ 5.14
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	\$ 19.09	\$ 19.60	\$ 18.94	\$ 19.58	\$ 17.87	\$ 17.85	\$ 17.64	\$ 18.17	\$ 18.04	\$ 17.88	\$ 15.47	\$ 18.03

Periodo	Ene 94	Feb 94	Mar 94	Abr 94	May 94	Jun 94	Jul 94	Ago 94	Sep 94	Oct 94	Nov 94	Dic 94
Concreto												
Autocompactable	364.774	364.913	370.862	373.261	371.828	373.506	374.895	374.251	374.857	375.407	376.325	393.144
Concreto Normal	373.745	373.82	377.002	378.285	377.518	378.416	379.159	378.814	379.138	379.433	379.924	388.919
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 8.97	\$ 8.91	\$ 6.14	\$ 5.02	\$ 5.69	\$ 4.91	\$ 4.26	\$ 4.56	\$ 4.28	\$ 4.03	\$ 3.60	-\$ 4.23
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	\$ 31.24	\$ 30.85	\$ 21.16	\$ 17.23	\$ 19.42	\$ 16.67	\$ 14.42	\$ 15.36	\$ 14.31	\$ 13.38	\$ 11.90	-\$13.85

Periodo	Ene 95	Feb 95	Mar 95	Abr 95	May 95	Jun 95	Jul 95	Ago 95	Sep 95	Oct 95	Nov 95	Dic 95
Concreto												
Autocompactable	465.747	471.673	506.697	525.864	514.252	523.229	520.335	522.112	525.951	539.348	572.683	603.913
Concreto Normal	440.282	443.451	462.183	495.325	489.115	493.916	492.368	493.318	495.372	502.537	520.366	558.681
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$25.47	-\$28.22	-\$44.51	-\$30.54	-\$25.14	-\$29.31	-\$27.97	-\$28.79	-\$30.58	-\$36.81	-\$52.32	-\$45.23
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$80.45	-\$85.53	127.39	-\$80.95	-\$63.96	-\$72.29	-\$67.59	-\$68.45	-\$71.22	-\$84.01	-\$ 116.52	-\$97.56

Periodo	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Concreto												
Autocompactable	598.581	598.556	600.934	638.55	637.289	641.003	643.784	640.028	641.089	645.924	653.974	719.678
Concreto Normal	555.829	555.815	557.088	605.724	605.049	607.036	608.523	606.514	607.082	609.668	613.973	695.663
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$42.75	-\$42.74	-\$43.85	-\$32.83	-\$32.24	-\$33.97	-\$35.26	-\$33.51	-\$34.01	-\$36.26	-\$40.00	-\$24.02
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$89.01	-\$86.96	-\$87.29	-\$63.54	-\$61.29	-\$63.54	-\$65.04	-\$61.00	-\$60.93	-\$64.16	-\$69.73	-\$40.56

Periodo	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
Concreto												
Autocompactable	718.077	716.782	722.635	720.605	720.687	722.103	719.995	716.49	716.302	717.401	733.682	728.602
Concreto Normal	694.806	694.114	697.244	696.159	696.202	696.96	695.832	693.958	693.857	694.445	703.153	700.436
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$23.27	-\$22.67	-\$25.39	-\$24.45	-\$24.48	-\$25.14	-\$24.16	-\$22.53	-\$22.44	-\$22.96	-\$30.53	-\$28.17
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$38.32	-\$36.71	-\$40.61	-\$38.69	-\$38.40	-\$39.08	-\$37.23	-\$34.41	-\$33.86	-\$34.36	-\$45.19	-\$41.11

Periodo	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
Concreto												
Autocompactable	798.188	808.983	811.587	809.196	811.304	822.807	823.114	835.353	868.274	866.092	860.426	930.127
Concreto Normal	784.841	790.615	792.008	790.729	791.856	798.008	798.172	804.719	822.326	821.159	818.129	905.537
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$13.35	-\$18.37	-\$19.58	-\$18.47	-\$19.45	-\$24.80	-\$24.94	-\$30.63	-\$45.95	-\$44.93	-\$42.30	-\$24.59
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$19.07	-\$25.79	-\$27.17	-\$25.39	-\$26.53	-\$33.43	-\$33.30	-\$40.51	-\$59.79	-\$57.65	-\$53.32	-\$30.26

Periodo	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Concreto												
Autocompactable	936.99	933.716	925.262	914.121	911.224	917.417	911.401	912.466	910.459	917.345	913.204	913.009
Concreto Normal	909.207	907.456	902.935	896.976	895.427	898.739	895.522	896.091	895.018	898.701	896.486	896.381
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$27.78	-\$26.26	-\$22.33	-\$17.14	-\$15.80	-\$18.68	-\$15.88	-\$16.38	-\$15.44	-\$18.64	-\$16.72	-\$16.63
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$33.35	-\$31.10	-\$26.20	-\$19.94	-\$18.26	-\$21.45	-\$18.11	-\$18.58	-\$17.35	-\$20.82	-\$18.50	-\$18.22

Periodo	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Concreto												
Autocompactable	974.432	973.256	968.116	970.838	975.423	985.413	974.072	967.712	969.343	975.772	975.772	973.214
Concreto Normal	970.283	969.654	966.905	968.36	970.813	976.156	970.09	966.689	967.561	970.999	970.999	969.632
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 4.15	-\$ 3.60	-\$ 1.21	-\$ 2.48	-\$ 4.61	-\$ 9.26	-\$ 3.98	-\$ 1.02	-\$ 1.78	-\$ 4.77	-\$ 4.77	-\$ 3.58
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 4.49	-\$ 3.86	-\$ 1.29	-\$ 2.62	-\$ 4.87	-\$ 9.72	-\$ 4.16	-\$ 1.06	-\$ 1.84	-\$ 4.89	-\$ 4.85	-\$ 3.60

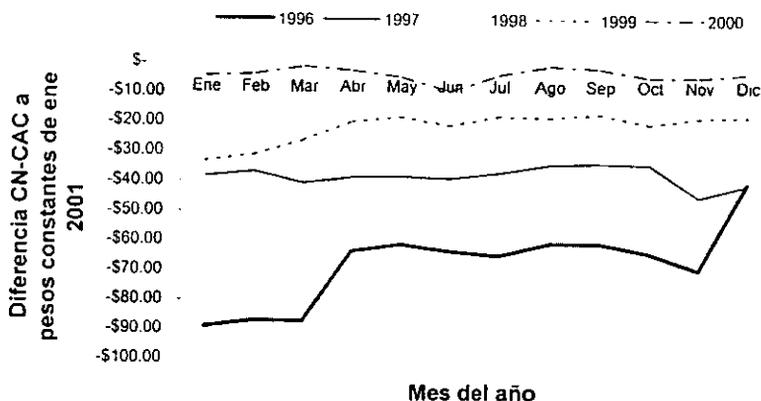
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto a lo largo del periodo de estudio</u>	<b>-\$23.08</b>
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante los últimos dos años</u>	<b>-\$12.88</b>
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante el último año</u>	<b>-\$ 3.94</b>

Los beneficios se encuentran a pesos constantes de enero de 2001.

La manera en que se calculó la diferencia de precios obedece a la fórmula:

$$=(\text{Aditivos}) \cdot \text{Gradiente Tipo de cambio} + (\text{Resto de conceptos} - \text{Aditivos}) \cdot \text{Gradiente INPC}$$

### Comparativo Utilizando el Tipo de Cambio y el INPC



### V.III.II. COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS UTILIZANDO LAS VARIACIONES DEL TIPO DE CAMBIO DE DOLARES VS PESOS MEXICANOS Y EL INCEVIS.<sup>5</sup>

En este apartado se encuentra el precio que tendrían los componentes de los concretos por mes, utilizando el tipo de cambio para los aditivos y el INCEVIS para el resto de los conceptos que conforman el costo total. El resultado obtenido a pesos corrientes se transforma a pesos constantes de enero de 2001.

Al final del análisis en el periodo de estudio (enero de 1990 a diciembre de 2000) se encuentra un resumen del comportamiento presentado a lo largo de todo el periodo de estudio, un resumen del comportamiento en los últimos dos años y en el último año.

Periodo	Ene 90	Feb 90	Mar 90	Abr 90	May 90	Jun 90	Jul 90	Ago 90	Sep 90	Oct 90	Nov 90	Dic 90
Concreto Autocompactable	221.238	224.023	226.588	230.851	233.983	236.454	238.495	241.466	246.332	248.373	252.58	259.697
Concreto Normal	208.158	210.873	213.323	217.825	220.948	223.339	225.262	228.323	233.711	235.633	240.265	248.691
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$13.08	-\$13.15	-\$13.26	-\$13.03	-\$13.03	-\$13.12	-\$13.23	-\$13.14	-\$12.62	-\$12.74	-\$12.31	-\$11.01
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$18.68	-\$18.46	-\$18.41	-\$17.91	-\$17.78	-\$17.68	-\$17.67	-\$17.38	-\$16.42	-\$16.34	-\$15.52	-\$13.54

<sup>5</sup> Los valores del índice y el tipo de cambio fueron obtenidos del Banco de México.

Periodo	Ene 91	Feb 91	Mar 91	Abr 91	May 91	Jun 91	Jul 91	Ago 91	Sep 91	Oct 91	Nov 91	Dic 91
Concreto												
Autocompactable	264.212	267.449	269.951	271.671	273.568	275.143	276.963	279.326	281.169	283.244	285.151	289.384
Concreto Normal	253.94	257.633	260.422	262.244	264.28	265.921	267.868	270.473	272.447	274.703	276.869	282.06
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$10.27	-\$ 9.82	-\$ 9.53	-\$ 9.43	-\$ 9.29	-\$ 9.22	-\$ 9.10	-\$ 8.85	-\$ 8.72	-\$ 8.54	-\$ 8.28	-\$ 7.32
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$14.67	-\$13.78	-\$13.22	-\$12.96	-\$12.67	-\$12.43	-\$12.14	-\$11.71	-\$11.35	-\$10.96	-\$10.44	-\$ 9.01
Periodo	Ene 92	Feb 92	Mar 92	Abr 92	May 92	Jun 92	Jul 92	Ago 92	Sep 92	Oct 92	Nov 92	Dic 92
Concreto												
Autocompactable	292.064	293.526	294.499	295.658	298.416	301.526	302.981	303.259	305.367	305.213	308.532	309.89
Concreto Normal	285.389	287.301	288.431	289.817	292.486	295.817	297.648	298.592	301.3	300.339	304.382	306.039
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 6.68	-\$ 6.22	-\$ 6.07	-\$ 5.84	-\$ 5.93	-\$ 5.71	-\$ 5.33	-\$ 4.67	-\$ 4.07	-\$ 4.88	-\$ 4.15	-\$ 3.81
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 9.54	-\$ 8.74	-\$ 8.42	-\$ 8.03	-\$ 8.09	-\$ 7.70	-\$ 7.12	-\$ 6.17	-\$ 5.29	-\$ 6.26	-\$ 5.23	-\$ 4.69

Periodo	Ene 93	Feb 93	Mar 93	Abr 93	May 93	Jun 93	Jul 93	Ago 93	Sep 93	Oct 93	Nov 93	Dic 93
Concreto												
Autocompactable	314.441	315.018	316.365	316.825	318.624	319.271	320.08	320.375	321.103	321.524	323.375	322.273
Concreto Normal	311.87	312.846	314.278	315.147	316.706	317.531	318.471	319.095	319.989	320.469	321.76	321.546
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 2.57	-\$ 2.17	-\$ 2.09	-\$ 1.68	-\$ 1.92	-\$ 1.74	-\$ 1.61	-\$ 1.28	-\$ 1.11	-\$ 1.06	-\$ 1.61	-\$ 0.73
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 3.67	-\$ 3.05	-\$ 2.90	-\$ 2.31	-\$ 2.62	-\$ 2.35	-\$ 2.15	-\$ 1.69	-\$ 1.45	-\$ 1.35	-\$ 2.04	-\$ 0.90

Periodo	Ene 94	Feb 94	Mar 94	Abr 94	May 94	Jun 94	Jul 94	Ago 94	Sep 94	Oct 94	Nov 94	Dic 94
Concreto												
Autocompactable	325.295	325.991	332.55	335.34	334.427	336.658	338.615	338.385	339.369	340.526	342.147	360.632
Concreto Normal	325.263	326.021	329.952	331.716	331.588	333.164	334.605	334.769	335.558	336.596	337.951	348.992
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 0.03	\$ 0.03	-\$ 2.60	-\$ 3.62	-\$ 2.84	-\$ 3.49	-\$ 4.01	-\$ 3.62	-\$ 3.81	-\$ 3.93	-\$ 4.20	-\$11.64
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 0.05	\$ 0.04	-\$ 3.60	-\$ 4.98	-\$ 3.87	-\$ 4.71	-\$ 5.35	-\$ 4.78	-\$ 4.96	-\$ 5.04	-\$ 5.29	-\$14.32

Periodo	Ene 95											
Concreto												
Autocompactable	429.878	444.126	489.865	502.299	500.429	515.872	515.883	519.757	525.224	540.675	578.011	591.802
Concreto Normal	396.233	409.622	441.513	466.387	472.14	484.881	486.901	490.427	494.48	504.167	526.908	543.809
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$33.65	-\$34.50	-\$48.35	-\$35.91	-\$28.29	-\$30.99	-\$28.98	-\$29.33	-\$30.74	-\$36.51	-\$51.10	-\$47.99
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$48.06	-\$48.44	-\$67.10	-\$49.37	-\$38.59	-\$41.78	-\$38.70	-\$38.79	-\$40.01	-\$46.84	-\$64.42	-\$59.06

Periodo	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Concreto												
Autocompactable	597.775	607.086	617.742	625.63	629.682	637.142	646.228	645.319	648.684	655.793	666.642	682.502
Concreto Normal	554.839	566.291	577.729	589.857	595.707	602.294	611.524	613.012	616.408	621.787	629.53	650.009
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$42.94	-\$40.79	-\$40.01	-\$35.77	-\$33.97	-\$34.85	-\$34.70	-\$32.31	-\$32.28	-\$34.01	-\$37.11	-\$32.49
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$61.33	-\$57.27	-\$55.53	-\$49.18	-\$46.34	-\$46.98	-\$46.33	-\$42.72	-\$42.00	-\$43.63	-\$46.78	-\$39.99

Periodo	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
Concreto Autocompactablee	689.196	695.479	705.191	706.066	709.466	713.208	715.039	714.926	719.655	725.569	750.812	756.728
Concreto Normal	659.34	667.953	675.823	678.304	682.423	686.036	689.746	692.037	697.975	704.477	724.188	734.976
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$29.86	-\$27.53	-\$29.37	-\$27.76	-\$27.04	-\$27.17	-\$25.29	-\$22.89	-\$21.68	-\$21.09	-\$26.62	-\$21.75
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$42.65	-\$38.64	-\$40.75	-\$38.17	-\$36.89	-\$36.63	-\$33.77	-\$30.27	-\$28.21	-\$27.06	-\$33.56	-\$26.77

Periodo	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
Concreto Autocompactablee	775.887	791.568	799.022	804.71	810.285	823.71	827.539	843.813	888.292	896.711	898.25	909.033
Concreto Normal	757.454	769.229	776.577	785.22	790.604	799.117	803.607	815.107	846.909	858.76	864.578	879.632
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$18.43	-\$22.34	-\$22.44	-\$19.49	-\$19.68	-\$24.59	-\$23.93	-\$28.71	-\$41.38	-\$37.95	-\$33.67	-\$29.40
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$26.33	-\$31.36	-\$31.15	-\$26.80	-\$26.84	-\$33.15	-\$31.95	-\$37.96	-\$53.85	-\$48.69	-\$42.45	-\$36.18

Periodo	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Concreto Autocompactablee	926.211	932.245	940.963	933.714	933.614	943.984	943.861	949.27	952.823	962.057	960.816	973.49
Concreto Normal	895.971	905.65	922.216	921.037	922.922	931.364	935.383	941.288	947.043	953.608	954.956	970.655
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$30.24	-\$26.60	-\$18.75	-\$12.68	-\$10.69	-\$12.62	-\$ 8.48	-\$ 7.98	-\$ 5.78	-\$ 8.45	-\$ 5.86	-\$ 2.84
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$36.30	-\$31.50	-\$22.00	-\$14.74	-\$12.36	-\$14.49	-\$ 9.67	-\$ 9.05	-\$ 6.49	-\$ 9.43	-\$ 6.49	-\$ 3.11

Periodo	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Concreto Autocompactablee	988.639	998.341	997.914	1007.1	1013.79	1026.02	1015.16	1009.79	1012.52	1021.52	1024.34	1023.72
Concreto Normal	987.73	1000.46	1003.5	1012.89	1017.93	1026.02	1020.55	1018.36	1020.58	1027.18	1030.64	1031.66
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 0.91	\$ 2.12	\$ 5.58	\$ 5.79	\$ 4.14	\$ 0.00	\$ 5.39	\$ 8.57	\$ 8.06	\$ 5.66	\$ 6.30	\$ 7.94
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	\$ 0.98	\$ 2.27	\$ 5.95	\$ 6.14	\$ 4.37	\$ 0.00	\$ 5.63	\$ 8.91	\$ 8.32	\$ 5.80	\$ 6.41	\$ 7.98

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto a lo largo del periodo de estudio **-\$19.95**

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante los últimos dos años **-\$ 4.78**

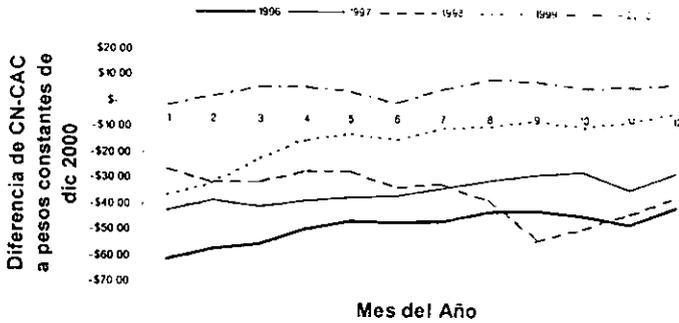
Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante el último año **\$ 5.07**

Los beneficios se encuentran a pesos constantes de enero de 2001.

La manera en que se calculó la diferencia de precios obedece a la fórmula:

$$= (\text{Aditivos}) * \text{Gradiente Tipo de cambio} + (\text{Resto de conceptos} - \text{Aditivos}) * \text{Gradiente INCEVIS}$$

### Comparativo utilizando el Tipo de Cambio y el INCEVIS



### V.III.III. COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS UTILIZANDO LAS VARIACIONES DEL TIPO DE CAMBIO DE DOLARES VS PESOS MEXICANOS Y LOS SUBINDICES DE MATERIALES Y MANO DE OBRA DEL INCEVIS.<sup>6</sup>

En este apartado se encuentra el precio que tendrían los componentes de los concretos por mes, utilizando el tipo de cambio para los aditivos y los subíndices de materiales para los componentes relacionados con los materiales y el subíndice de mano de obra con todos los componentes que tengan relación con la mano de obra del INCEVIS. El resultado obtenido a pesos corrientes se transforma a pesos constantes de enero de 2001.

Al final del análisis en el periodo de estudio (agosto de 1996 a diciembre de 2000) se encuentra un resumen del comportamiento presentado a lo largo de todo el periodo de estudio, un resumen del comportamiento en los últimos dos años y en el último año.

Periodo	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Concreto Autocompactable	0	0	0	0	0	0	0	645.658	649.432	656.947	668.296	676.163
Concreto Normal	0	0	0	0	0	0	0	613.337	617.125	622.893	631.116	643.931
Diferencia en \$ corrientes por m3	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	-\$32.32	-\$32.31	-\$34.05	-\$37.18	-\$32.23
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001								-\$42.74	-\$42.04	-\$43.69	-\$46.87	-\$39.66

<sup>6</sup> Los valores del índice y el tipo de cambio se obtuvo del Banco de México.

Periodo	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
Concreto												
Autocompactable	683.546	691.181	701.582	702.979	706.967	711.124	713.656	714.15	719.757	726.531	753.372	761.251
Concreto Normal	653.923	663.832	672.362	675.341	680.027	684.038	688.42	691.293	698.073	705.399	726.644	739.312
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$29.62	-\$27.35	-\$29.22	-\$27.63	-\$26.94	-\$27.09	-\$25.24	-\$22.86	-\$21.68	-\$21.13	-\$26.73	-\$21.94
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$42.32	-\$38.40	-\$40.55	-\$37.99	-\$36.75	-\$36.51	-\$33.69	-\$30.23	-\$28.22	-\$27.11	-\$33.69	-\$27.00

Periodo	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
Concreto												
Autocompactable	771.81	788.364	796.683	803.813	810.006	823.775	828.232	845.226	891.768	902.079	904.904	912.198
Concreto Normal	753.548	766.156	774.335	784.36	790.337	799.18	804.271	816.462	850.242	863.906	870.957	882.667
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$18.26	-\$22.21	-\$22.35	-\$19.45	-\$19.67	-\$24.60	-\$23.96	-\$28.76	-\$41.53	-\$38.17	-\$33.95	-\$29.53
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$26.09	-\$31.18	-\$31.01	-\$26.74	-\$26.83	-\$33.16	-\$31.99	-\$38.04	-\$54.04	-\$48.97	-\$42.79	-\$36.34

Periodo	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Concreto												
Autocompactable	926.345	932.559	944.072	937.28	937.516	948.069	948.059	954.169	958.72	968.358	967.608	982.567
Concreto Normal	896.099	905.951	925.197	924.456	926.664	935.28	939.408	945.984	952.703	959.655	961.47	979.364
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$30.25	-\$26.61	-\$18.88	-\$12.82	-\$10.85	-\$12.79	-\$ 8.65	-\$ 8.18	-\$ 6.02	-\$ 8.70	-\$ 6.14	-\$ 3.20
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$36.30	-\$31.51	-\$22.15	-\$14.91	-\$12.54	-\$14.68	-\$ 9.87	-\$ 9.28	-\$ 6.76	-\$ 9.72	-\$ 6.79	-\$ 3.51

Periodo	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Concreto												
Autocompactable	992.877	1000.04	1000.32	1010.66	1017.64	1030.27	1019.5	1014.29	1017.14	1026.58	1029.89	1029.57
Concreto Normal	991.793	1002.08	1005.81	1016.3	1021.62	1030.1	1024.71	1022.67	1025.01	1032.04	1035.96	1037.27
Diferencia en \$ corrientes por m3	-\$ 1.08	\$ 2.05	\$ 5.49	\$ 5.65	\$ 3.98	-\$ 0.17	\$ 5.21	\$ 8.39	\$ 7.87	\$ 5.45	\$ 6.07	\$ 7.69
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$ 1.17	\$ 2.19	\$ 5.85	\$ 5.98	\$ 4.20	-\$ 0.18	\$ 5.45	\$ 8.72	\$ 8.13	\$ 5.59	\$ 6.17	\$ 7.74

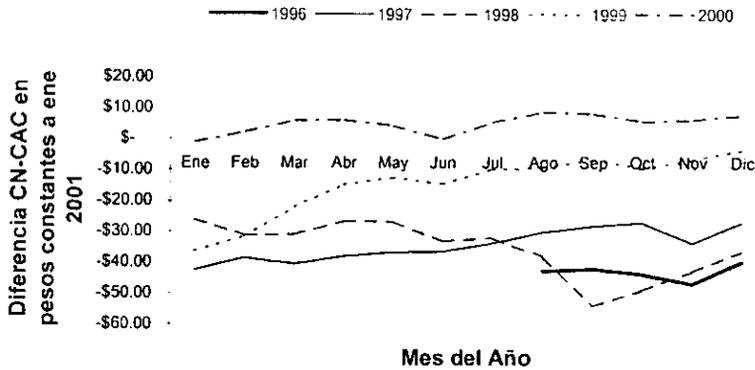
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto a lo largo del periodo de estudio</u>	<b>-\$22.15</b>
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante los últimos dos años</u>	<b>-\$ 4.97</b>
<u>Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante el último año</u>	<b>\$ 4.89</b>

Los beneficios se encuentran a pesos constantes de enero de 2001.

La manera en que se calculó la diferencia de precios obedece a la fórmula:

$$= (\text{Aditivos}) * \text{Gradiente Tipo de cambio} + (\text{Conceptos materiales} - \text{aditivos}) * \text{Gradiente INCEVIS} \\ \text{MATERIALES} + (\text{Conceptos por mano de obra}) * \text{Gradiente INCEVIS Mano de Obra}$$

### Comparativo Utilizando Subindices del INCEVIS y el Tipo de Cambio



### V.III.IV. COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS UTILIZANDO LAS VARIACIONES DEL TIPO DE CAMBIO DE DOLARES VS PESOS MEXICANOS Y LOS CONCEPTOS INDIVIDUALES DEL INCEVIS.

En este apartado se encuentra el precio que tendrían los componentes de los concretos por mes, utilizando el tipo de cambio para los aditivos y los índices individuales que conforman el INCEVIS. El resultado obtenido a pesos corrientes se transforma a pesos constantes de enero de 2001.

Al final del análisis en el periodo de estudio (agosto de 1996 a diciembre de 2000) se encuentra un resumen del comportamiento presentado a lo largo de todo el periodo de estudio, un resumen del comportamiento en los últimos dos años y en el último año.

Periodo	Ene 96	Feb 96	Mar 96	Abr 96	May 96	Jun 96	Jul 96	Ago 96	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Dic 96
Concreto Autocompactable	0	0	0	0	0	0	0	773.612	790.878	808.64	823.235	831.193
Concreto Normal	0	0	0	0	0	0	0	770.593	790.542	808.59	820.724	832.265
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 3.02	-\$ 0.34	-\$ 0.05	-\$ 2.51	\$ 1.07
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001								-\$ 3.99	-\$ 0.44	-\$ 0.06	-\$ 3.17	\$ 1.32

Periodo	Ene 97	Feb 97	Mar 97	Abr 97	May 97	Jun 97	Jul 97	Ago 97	Sep 97	Oct 97	Nov 97	Dic 97
Concreto Autocompactable	670.586	680.489	688.466	686.725	687.785	691.103	695.84	698.383	704.382	712.37	742.636	753.788
Concreto Normal	638.058	650.76	656.431	655.691	656.904	659.936	666.997	672.356	679.655	688.483	713.917	730.616
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$32.53	-\$29.73	-\$32.04	-\$31.03	-\$30.88	-\$31.17	-\$28.84	-\$26.03	-\$24.73	-\$23.89	-\$28.72	-\$23.17
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$46.47	-\$41.74	-\$44.45	-\$42.67	-\$42.12	-\$42.01	-\$38.51	-\$34.42	-\$32.18	-\$30.65	-\$36.20	-\$28.52

Periodo	Ene 98	Feb 98	Mar 98	Abr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Ago 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dic 98
Concreto Autocompactable	762.941	778.842	785.324	794.843	801.107	813.598	816.12	833.716	882.84	893.585	894.465	901.254
Concreto Normal	742.662	754.543	760.574	773.541	779.638	786.973	789.787	802.739	839.727	854.022	858.82	869.736
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$20.28	-\$24.30	-\$24.75	-\$21.30	-\$21.47	-\$26.63	-\$26.33	-\$30.98	-\$43.11	-\$39.56	-\$35.64	-\$31.52
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$28.97	-\$34.11	-\$34.35	-\$29.29	-\$29.28	-\$35.89	-\$35.16	-\$40.96	-\$56.10	-\$50.76	-\$44.93	-\$38.79

Periodo	Ene 99	Feb 99	Mar 99	Abr 99	May 99	Jun 99	Jul 99	Ago 99	Sep 99	Oct 99	Nov 99	Dic 99
Concreto Autocompactable	990.641	980.732	972.305	961.141	958.242	964.42	958.431	959.499	957.482	964.391	960.228	960.015
Concreto Normal	975.956	965.42	960.932	954.946	953.393	956.687	953.501	954.076	952.991	956.702	954.459	954.333
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$14.68	-\$15.31	-\$11.37	-\$ 6.19	-\$ 4.85	-\$ 7.73	-\$ 4.93	-\$ 5.42	-\$ 4.49	-\$ 7.69	-\$ 5.77	-\$ 5.68
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	-\$17.63	-\$18.13	-\$13.35	\$ 7.20	\$ 5.60	\$ 8.88	\$ 5.62	\$ 6.15	\$ 5.05	\$ 8.59	\$ 6.38	\$ 6.23

Periodo	Ene 00	Feb 00	Mar 00	Abr 00	May 00	Jun 00	Jul 00	Ago 00	Sep 00	Oct 00	Nov 00	Dic 00
Concreto Autocompactable	968.865	981.717	987.657	1024.64	1032	1043.36	1032.28	1026.04	1027.8	1030.68	1027.29	1028.99
Concreto Normal	964.31	981.008	991.266	1035.29	1040.78	1047.38	1041.58	1038.21	1038.93	1037.57	1033.29	1036.55
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	-\$ 4.56	-\$ 0.71	\$ 3.61	\$ 10.65	\$ 8.78	\$ 4.02	\$ 9.31	\$ 12.17	\$ 11.14	\$ 6.89	\$ 6.00	\$ 7.56
Diferencia en \$ constantes a enero de 2001	\$ 4.93	-\$ 0.76	\$ 3.85	\$ 11.29	\$ 9.27	\$ 4.22	\$ 9.73	\$ 12.65	\$ 11.50	\$ 7.07	\$ 6.10	\$ 7.61

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto a lo largo del periodo de estudio **-\$18.04**

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante los últimos dos años **-\$ 1.30**

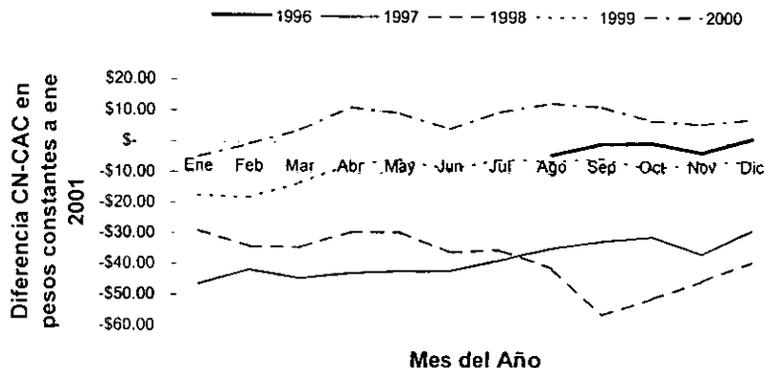
Beneficio promedio por metro cúbico de concreto durante el último año **\$ 6.47**

Los beneficios se encuentran a pesos constantes de enero de 2001.

La manera en que se calculó la diferencia de precios obedece a la fórmula:

$$= (\text{Aditivos}) * \text{Gradiente Tipo de cambio} + (\text{Conceptos materiales} - \text{aditivos}) * \text{Gradiente INCEVIS Materiales} \\ + \text{Albañilería} + (\text{Conceptos por mano de obra}) * \text{Gradiente INCEVIS Mano de Obra Albañilería}$$

### C Comparativo Utilizando Conceptos Individuales del INCEVIS y el Tipo de Cambio



Con los resultados que se pueden obtener de este análisis el concreto autocompactable fue rentable durante los últimos dos años, especialmente en el año anterior. En este periodo existió una calma económica en nuestro país lo cual influyó positivamente en el valor del concreto autocompactable respecto del valor del concreto normal.

Para los años anteriores la resaca de la crisis que se vivió en nuestro país a finales de 1994 y principios de 1995 afectó considerablemente el valor del concreto autocompactable respecto del concreto normal, lo cual se puede comprobar en el análisis anterior ya que los costos asociados a los materiales caros de los concretos (cementos y aditivos) fueron superiores a los costos asociados a la mano de obra.

Al tener materiales más caros los concretos autocompactables que los concretos normales, se hace mucho más difícil que en esas condiciones se pueda tener un balance económico entre los dos tipos de concreto. Ya que los conceptos que balancean los costos entre ambos tipos son los costos asociados a la mano de obra y mientras más porcentaje sea la mano de obra del costo total del concreto, mayor es la posibilidad de que sean viables los concretos autocompactables.

#### V.IV. PREDICCIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS UTILIZANDO EL INCEVIS, INPC Y EL TIPO DE CAMBIO.

En esta sección se harán varios análisis que ilustrarán, bajo varias perspectivas, los posibles cambios que se podrían presentar en las tasas de cambio de cada uno de los índices presentados.

Con estas tasas se aplicará el precio a pesos corrientes y después se convertirán a pesos constantes de enero de 2001. Las fórmulas empleadas en este apartado corresponden a las mismas fórmulas descritas anteriormente en este mismo capítulo pero en lugar de usar el índice del periodo, utilizo el valor del índice a enero de 2001 y lo multiplico por la tasa de crecimiento mensual esperado de cada uno de los periodos que han transcurrido, de esta forma se escala el valor del concreto y se puede hacer una evaluación en las mismas condiciones.

A continuación se presenta la tabla con los incrementos porcentuales mensuales de las tasas a considerar en los diferentes índices, bajo los diferentes escenarios.

Índice	INPC	INCEVIS	INCEVIS Materiales	INCEVIS Mano de obra	Tipo de Cambio
Tasa mensual de cambio, tendencia de las gráficas	1.14%	1.17%	1.16%	1.22%	0.52%
Tasa mensual de cambio, mayor a la tendencia de las gráficas	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.00%
Tasa mensual de cambio, tendencia cercana al doble de la tendencia de la gráfica	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	1.50%
Tasa mensual de cambio, tendencia menor a la tendencia de la gráfica	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.25%

**V.IV.I. PROYECCIÓN ESPERADA UTILIZANDO EL INPC Y EL TIPO DE CAMBIO.**

Análisis para la tasa de tipo de cambio que se ajusta a la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactablee	1049.23	1056.78	1064.4	1072.08	1079.83	1087.64	1095.52	1103.46	1111.47	1119.55	1127.69	1135.91
Concreto Normal	1055.2	1061.82	1068.49	1075.21	1081.97	1088.79	1095.65	1102.56	1109.53	1116.54	1123.6	1130.71
Diferencia en \$ corrientes por m3	\$ 5.97	\$ 5.04	\$ 4.09	\$ 3.13	\$ 2.15	\$ 1.15	\$ 0.13	-\$ 0.90	-\$ 1.94	-\$ 3.01	-\$ 4.09	-\$ 5.19
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 4.98	\$ 4.00	\$ 3.02	\$ 2.05	\$ 1.08	\$ 0.13	-\$ 0.83	-\$ 1.78	-\$ 2.72	-\$ 3.65	-\$ 4.59

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 0.64**

Análisis con una tasa de cambio mayor a la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactablee	1049.23	1061.4	1073.72	1086.19	1098.82	1111.59	1124.52	1137.6	1150.85	1164.25	1177.82	1191.55
Concreto Normal	1055.2	1066.65	1078.23	1089.94	1101.78	1113.75	1125.86	1138.1	1150.48	1163	1175.66	1188.46
Diferencia en \$ corrientes por m3	\$ 5.97	\$ 5.25	\$ 4.51	\$ 3.74	\$ 2.96	\$ 2.16	\$ 1.34	\$ 0.50	-\$ 0.37	-\$ 1.25	-\$ 2.16	-\$ 3.09
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 5.19	\$ 4.41	\$ 3.62	\$ 2.83	\$ 2.04	\$ 1.25	\$ 0.46	-\$ 0.33	-\$ 1.13	-\$ 1.93	-\$ 2.73

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 1.64**

Análisis con una tasa de cambio del doble de magnitud que la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactablee	1049.23	1066.65	1084.36	1102.38	1120.7	1139.33	1158.28	1177.55	1197.15	1217.08	1237.34	1257.95
Concreto Normal	1055.2	1071.93	1088.92	1106.19	1123.74	1141.57	1159.69	1178.1	1196.8	1215.81	1235.12	1254.75
Diferencia en \$ corrientes por m3	\$ 5.97	\$ 5.28	\$ 4.56	\$ 3.81	\$ 3.04	\$ 2.24	\$ 1.41	\$ 0.55	-\$ 0.34	-\$ 1.27	-\$ 2.22	-\$ 3.21
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 5.22	\$ 4.46	\$ 3.69	\$ 2.90	\$ 2.11	\$ 1.31	\$ 0.50	-\$ 0.31	-\$ 1.14	-\$ 1.98	-\$ 2.83

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 1.66**

Análisis con una tasa de cambio de la mitad de magnitud que la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactablee	1049.23	1053.53	1057.86	1062.21	1066.59	1070.99	1075.42	1079.86	1084.34	1088.83	1093.36	1097.9
Concreto Normal	1055.2	1058.74	1062.29	1065.86	1069.44	1073.04	1076.66	1080.29	1083.94	1087.61	1091.29	1094.99
Diferencia en \$ corrientes por m3	\$ 5.97	\$ 5.20	\$ 4.43	\$ 3.64	\$ 2.85	\$ 2.05	\$ 1.25	\$ 0.43	-\$ 0.39	-\$ 1.23	-\$ 2.07	-\$ 2.91
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 5.14	\$ 4.33	\$ 3.52	\$ 2.73	\$ 1.94	\$ 1.16	\$ 0.40	-\$ 0.36	-\$ 1.11	-\$ 1.84	-\$ 2.57

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 1.61**

**Beneficio promedio esperado para el año en curso \$ 1.39**

A pesar de ser un beneficio marginal, durante el año 2001 existe evidencia de una ventaja económica y técnica de los concretos autocompactables sobre los concretos normales, bajo los cuatro escenarios que se utilizaron en este análisis.

Los cuatro beneficios obtenidos a pesos constantes de enero de 2001 se promediaron ya que de esta manera se da igual probabilidad a los cuatro escenarios y el análisis no involucra una evaluación enfocada a la economía en su conjunto.

El índice tomado para la realización este análisis es el menos favorable para los concretos autocompactables y por tanto se puede esperar que en los análisis que se efectúen con los otros índices el beneficio sea mayor.

## V.IV.II. PROYECCIÓN ESPERADA UTILIZANDO EL INCEVIS Y TIPO DE CAMBIO.

Análisis para la tasa de tipo de cambio que se ajusta a al tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1059.29	1069.46	1079.74	1090.13	1100.63	1111.23	1121.95	1132.78	1143.73	1154.79	1165.97
Concreto Normal	1055.2	1066.34	1077.6	1088.99	1100.51	1112.16	1123.93	1135.84	1147.88	1160.05	1172.36	1184.8
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 7.05	\$ 8.14	\$ 9.25	\$ 10.38	\$ 11.53	\$ 12.70	\$ 13.89	\$ 15.09	\$ 16.32	\$ 17.56	\$ 18.83
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.97	\$ 7.96	\$ 8.94	\$ 9.92	\$ 10.90	\$ 11.87	\$ 12.83	\$ 13.78	\$ 14.74	\$ 15.68	\$ 16.62

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 11.35**

Análisis con una tasa de cambio mayor a la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1063.28	1077.53	1091.98	1106.62	1121.47	1136.53	1151.79	1167.26	1182.95	1198.85	1214.98
Concreto Normal	1055.2	1070.13	1085.27	1100.63	1116.21	1132.02	1148.05	1164.32	1180.82	1197.56	1214.53	1231.76
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.84	\$ 7.74	\$ 8.65	\$ 9.59	\$ 10.55	\$ 11.53	\$ 12.53	\$ 13.56	\$ 14.61	\$ 15.68	\$ 16.78
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.77	\$ 7.56	\$ 8.36	\$ 9.16	\$ 9.97	\$ 10.77	\$ 11.58	\$ 12.38	\$ 13.19	\$ 14.01	\$ 14.82

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 10.38**

Análisis con una tasa de cambio del doble de magnitud que la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1068.53	1088.19	1108.22	1128.63	1149.41	1170.59	1192.16	1214.14	1236.52	1259.33	1282.56
Concreto Normal	1055.2	1075.4	1096	1116.99	1138.39	1160.2	1182.43	1205.1	1228.2	1251.75	1275.76	1300.23
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.87	\$ 7.81	\$ 8.77	\$ 9.76	\$ 10.79	\$ 11.85	\$ 12.94	\$ 14.07	\$ 15.23	\$ 16.43	\$ 17.67
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.80	\$ 7.63	\$ 8.48	\$ 9.33	\$ 10.19	\$ 11.07	\$ 11.95	\$ 12.85	\$ 13.76	\$ 14.67	\$ 15.60

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 10.69**

Análisis con una tasa de cambio de la mitad de magnitud de la tendencia de los índices

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1055.41	1061.64	1067.91	1074.23	1102.37	1086.98	1093.43	1099.92	1106.45	1113.03	1119.65
Concreto Normal	1055.2	1062.21	1069.28	1076.39	1083.56	1090.78	1098.04	1105.37	1112.74	1120.17	1127.65	1162.2
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.80	\$ 7.63	\$ 8.48	\$ 9.33	-\$11.59	\$ 11.06	\$ 11.94	\$ 12.82	\$ 13.72	\$ 14.62	\$ 42.55
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.72	\$ 7.46	\$ 8.20	\$ 8.92	-\$10.95	\$ 10.33	\$ 11.03	\$ 11.71	\$ 12.39	\$ 13.06	\$ 37.57

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$10.20

Beneficio promedio esperado para el año en curso \$10.65

Bajo este análisis el beneficio promedio obtenido para el periodo de proyección indica que existirá un beneficio considerable por metro cúbico durante el año 2001. Estos datos establecen que existe tanto una ventaja técnica como económica de los concretos autocompactables sobre los concretos normales.

Los cuatro beneficios obtenidos a pesos constantes de enero de 2001 se promediaron ya que de esta manera se da igual probabilidad a los cuatro escenarios y el análisis no involucra una evaluación enfocada a la economía en su conjunto.

El índice tomado para la realización este análisis es el menos favorable para los concretos autocompactables y por tanto se puede esperar que en los análisis que se efectúen con los otros índices el beneficio sea mayor.

### V.IV.III. PROYECCIÓN ESPERADA UTILIZANDO LOS SUBÍNDICES DEL INCEVIS Y TIPO DE CAMBIO.

Análisis para la tasa de tipo de cambio que se ajusta a al tendencia de los índices seleccionados.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1059.28	1069.44	1079.7	1090.07	1100.55	1111.14	1121.85	1132.66	1143.59	1154.64	1165.8
Concreto Normal	1055.2	1066.34	1077.6	1088.99	1100.51	1112.15	1123.93	1135.83	1147.87	1160.04	1172.35	1184.8
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 7.06	\$ 8.17	\$ 9.29	\$ 10.44	\$ 11.60	\$ 12.79	\$ 13.99	\$ 15.21	\$ 16.45	\$ 17.71	\$ 18.99
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.98	\$ 7.99	\$ 8.98	\$ 9.98	\$ 10.96	\$ 11.95	\$ 12.92	\$ 13.89	\$ 14.86	\$ 15.82	\$ 16.77

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 11.42

Análisis con una tasa de cambio mayor a la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1063.28	1077.53	1091.98	1106.62	1121.47	1136.53	1151.79	1167.26	1182.95	1198.85	1214.98
Concreto Normal	1055.2	1070.13	1085.27	1100.63	1116.21	1132.02	1148.05	1164.32	1180.82	1197.56	1214.53	1231.76
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.84	\$ 7.74	\$ 8.65	\$ 9.59	\$ 10.55	\$ 11.53	\$ 12.53	\$ 13.56	\$ 14.61	\$ 15.68	\$ 16.78
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.77	\$ 7.56	\$ 8.36	\$ 9.16	\$ 9.97	\$ 10.77	\$ 11.58	\$ 12.38	\$ 13.19	\$ 14.01	\$ 14.82

Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 10.38

Análisis con una tasa de cambio del doble de magnitud que la tendencia de los índices

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1068.53	1088.19	1108.22	1128.63	1149.41	1170.59	1192.16	1214.14	1236.52	1259.33	1282.56
Concreto Normal	1055.2	1075.4	1096	1116.99	1138.39	1160.2	1182.43	1205.1	1228.2	1251.75	1275.76	1300.23
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.87	\$ 7.81	\$ 8.77	\$ 9.76	\$ 10.79	\$ 11.85	\$ 12.94	\$ 14.07	\$ 15.23	\$ 16.43	\$ 17.67
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.80	\$ 7.63	\$ 8.48	\$ 9.33	\$ 10.19	\$ 11.07	\$ 11.95	\$ 12.85	\$ 13.76	\$ 14.67	\$ 15.60

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 10.69**

Análisis con una tasa de cambio de la mitad de magnitud que la tendencia de los índices.

Periodo	Ene 01	Feb 01	Mar 01	Abr 01	May 01	Jun 01	Jul 01	Ago 01	Sep 01	Oct 01	Nov 01	Dic 01
Concreto Autocompactable	1049.23	1055.41	1061.64	1067.91	1074.23	1080.58	1086.98	1092.92	1099.33	1106.45	1113.03	1119.65
Concreto Normal	1055.2	1062.21	1069.28	1076.39	1083.56	1089.61	1098.04	1105.37	1110.84	1120.17	1127.65	1135.18
Diferencia en \$ corrientes por m <sup>3</sup>	\$ 5.97	\$ 6.80	\$ 7.63	\$ 8.48	\$ 9.33	\$ 9.02	\$ 11.06	\$ 12.45	\$ 11.51	\$ 13.72	\$ 14.62	\$ 15.53
Diferencia en \$ constantes enero de 2001	\$ 5.97	\$ 6.72	\$ 7.46	\$ 8.20	\$ 8.92	\$ 8.53	\$ 10.33	\$ 11.50	\$ 10.51	\$ 12.39	\$ 13.06	\$ 13.72

**Beneficio promedio por metro cúbico de concreto esperados durante el año en curso \$ 9.78**

**Beneficio promedio esperado para el año en curso \$10.57**

Bajo este análisis, utilizando el índice que mejor refleja el comportamiento económico tanto de los materiales como de los conceptos asociados, el beneficio promedio obtenido para el periodo de proyección indica que existirá un beneficio considerable por metro cúbico durante el año 2001, que hacen atractivos a los concretos autocompactables. Estos datos establecen que existe tanto una ventaja técnica como económica de los concretos autocompactables sobre los concretos normales.

Los cuatro beneficios obtenidos a pesos constantes de enero de 2001 se promediaron ya que de esta manera se da igual probabilidad a los cuatro escenarios y el análisis no involucra una evaluación enfocada a la economía en su conjunto.

El índice tomado para la realización este análisis es el menos favorable para los concretos autocompactables y por tanto se puede esperar que en los análisis que se efectúen con los otros índices el beneficio sea mayor.

Dado que bajo los tres análisis el concreto autocompactable presentaba beneficios puedo concluir que el concreto autocompactable es viable económicamente para su uso a escala general para el próximo año, tomando en consideración que este modelo se basa en las variaciones que han tenido históricamente los índices que reflejan el comportamiento de los concretos a través del tiempo y que el beneficio esperado para este año es de 7.64 pesos por metro cúbico de concreto.

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los capítulos anteriores describí las pruebas que normalmente se les aplican a los concretos normales y autocompactables para poder medir las principales características que tienen. Como parte importante de este trabajo documenté las pruebas y resultados que surgieron de este esfuerzo para tener una opinión objetiva y sustentada sobre la viabilidad del uso de los concretos autocompactables en la industria de la construcción mexicana, especialmente pensando en su utilización para la construcción de viviendas de interés social.

En este capítulo haré un compilado de los resultados más relevantes que obtuve al estudiar los concretos autocompactables con la finalidad de puntualizar las mayores ventajas y desventajas encontradas. Me parece prudente remarcar que las conclusiones de los resultados obtenidos en este trabajo se hacen a partir de un número limitado de mezclas y ensayos, pero a pesar de ser relativamente pocos, me permitieron tener una visión consistente y general de las características y potencial que presenta esta tecnología. Por tal motivo, las conclusiones de los resultados obtenidos tal vez no apliquen a todas las mezclas de concreto autocompactable, pero muy posiblemente si apliquen a la generalidad de ellos, ya que este es el fin de este documento.

Actualmente, es común que se utilice en viviendas de interés social concretos que cuenten con una resistencia menor a la resistencia presentada por la mezcla de concreto autocompactable utilizada para los modelos económicos (una resistencia cercana a 15 MPa a diferencia de los 30.5 MPa de la mezcla autocompactable propuesta). Cuando propuse la resistencia de la mezcla a diseñar, yo estaba considerando un proyecto que buscara disminuir el volumen empleado al utilizar una resistencia mayor, pero este trabajo lo pude haber realizado con cualquier resistencia de diseño que se hubiera propuesto. La resistencia deberá estar en función de la conveniencia del proyecto y no de un criterio arbitrario como el que empleé para este trabajo.

Pasando a los resultados obtenidos en esta tesis, en el Capítulo III: "Control de experimentos y trabajo en laboratorio" detallé de manera extensa el excelente comportamiento que tuvieron las mezclas preparadas de concretos autocompactables, así como sus proporciones respecto de los concretos normales, ya que logré realizar una mezcla con las características necesarias tanto de alta fluidez como de alta cohesividad que se requieren para un concreto autocompactable. Estas características son las que le dan al concreto autocompactable ventajas sobre el concreto normal para poderlo emplear en lugares de difícil acceso o inseguras para el personal, zonas altamente congestionadas ya sea por instalaciones o por acero de refuerzo, en proyectos donde el tiempo de realización sea muy pequeño o bien, en proyectos en los que se requiera trabajar de manera silenciosa.

Las mezclas preparadas con las propiedades especificadas en el capítulo III bajo el nombre de mezcla 12 tuvieron un revenimiento mucho mayor que el presentado por un concreto normal (de 15 cm en un concreto normal a 27cm en estas mezclas) lo que les permite penetrar en cualquier resquicio y así poder llenar completamente cualquier volumen. La cohesión de los concretos autocompactables preparados fue especialmente buena ya que permitía una fluidez alta y homogénea de todos los materiales que lo conformaban, lo que se traduce en un mejor desempeño general. Estos factores quedaron de manifiesto al tener un esparcimiento grande de la mezcla (mayor a 60 cm) y el tiempo obtenido en la prueba del embudo tipo V (menor a 20 segundos).

Con las pruebas de resistencia que realicé comprobé que la resistencia obtenida por un concreto autocompactable al que no se le añade energía de vibrado es muy semejante a la resistencia que se obtiene de esa misma mezcla al incorporarle energía de vibrado (una resistencia mayor al 99% de la resistencia de una mezcla compactada). Además, la diferencia de resistencias disminuía al

mejorar las características autocompactables de las mezclas, lo que se puede observar en los resultados de los cilindros probados a compresión que tenían las proporciones de las mezclas 10 y 12, especificadas en el capítulo III, donde la diferencia entre la mezcla no compactada a la compacta disminuyó de un 3% a un 1% de la resistencia del concreto vibrado.

Con la experiencia que tuve, puedo expresar que el diseño de concretos autocompactables es relativamente sencillo, pero el control que debe existir en cuanto a la cantidad y calidad de los materiales empleados debe ser muy estricto para poder asegurar la calidad final de las propiedades que presentarán los concretos autocompactables, ya que un cambio drástico en alguna de las propiedades de cualquiera de los materiales se reflejará tanto en el desempeño físico como en el económico.

Al haber logrado una mezcla de concreto autocompactable confirmo que en México la limitante para poder utilizar los concretos autocompactables no radica en la parte técnica, aunque forme una componente de impacto en otros ámbitos, sino en la parte económica. Lo anterior genera una gran cantidad de cuestiones a cuidar al realizar una mezcla autocompactable.

En este trabajo incluí un análisis económico que le realicé a los dos tipos de concreto estudiados bajo las mismas condiciones. A continuación describiré los puntos de mayor importancia que detecté con la información obtenida del análisis económico mencionado.

Dentro de los resultados obtenidos, observé que los componentes que más impacto tienen en el comportamiento económico global de las mezclas son los aditivos y el cemento, pero el elemento que inclina la balanza comparativa entre los concretos normales y los concretos autocompactables es la mano de obra.

Existe una gran cantidad de puntos relacionados con la utilización de los concretos autocompactables, yo considero que el tema más importante es definir las proporciones máximas de cementantes que se pueden utilizar, ya que este concepto interactúa de manera importante en las características finales que presenta el concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido, y además es el concepto que más impacta en el costo del concreto, por el costo unitario de los cementantes y porque la cantidad a emplear de aditivos esta directamente relacionada con la cantidad de cementantes en la mezcla.

La limitante de la cantidad de cementantes también determinará la efectividad requerida de los aditivos que se requieran usar, ya que debe haber un balance entre el costo del aditivo, la cantidad utilizada y los resultados obtenidos. Al realizar este trabajo, esta limitante tuvo efectos en la decisión del aditivo a utilizar en las mezclas de concretos autocompactables, ya que para poder obtener un concreto autocompactable utilizando un aditivo la cantidad de cementantes que se debía utilizar era grande (mayor a 300 kilogramos por metro cúbico), por lo que opté por cambiar a un aditivo que generaba mejores resultados pero su costo es mucho mayor por unidad de volumen. El primer aditivo empleado a pesar de ser mucho mas barato (aproximadamente 7 veces más barato) generaba costos mayores ya que para obtener resultados aceptables requería concentraciones mayores de cementantes y aditivos por metro cúbico lo que llevaría a la mezcla a ser tan cara que no se justificara su costo.

Por tal motivo, cuando se piense en utilizar a gran escala los concretos autocompactables se debe conocer a detalle dónde se encuentran los puntos de indiferencia entre los aditivos disponibles en el mercado para poder cumplir tanto con los requerimientos del proyecto como un costo aceptable del concreto a emplear. Con esto también habrá que tener en cuenta la relación que existe entre la proporción de aditivos en la mezcla, el beneficio obtenido y el cambio en el costo de la mezcla. Con esta información se podrán tomar decisiones más acertadas al emplear un tipo de aditivo u otro, pero sería más importante para determinar si el cambio a otro aditivo generaría beneficios reales.

De acuerdo a lo que observé en el análisis económico, la mano de obra y el rendimiento de ésta, hacen la diferencia para la conveniencia de un tipo de concreto sobre el otro. Dado que en nuestro país la remuneración que se da a la mano de obra es relativamente pequeña respecto de otros países y por tal motivo si la remuneración pierde su proporción respecto de la que tiene con los materiales hará que el uso de los concretos autocompactables sea mucho más reducido o imposible en México.

Otro punto que también genera una diferencia importante entre los costos de los concretos son los costos asociados a los trabajos por reparaciones para dejar al elemento a construir de manera aceptable, es más, en los concretos autocompactables el costo asociado a este concepto representa el 0.56% del costo total del concreto autocompactable, en cambio en el concreto normal el costo por reparaciones es de 1.39% del costo total del concreto normal y es 2.5 veces mayor que el costo en el concreto autocompactable.

Para las condiciones supuestas con las que se hicieron los cálculos de viabilidad, los costos por mano de obra ascienden a poco más de 4.5% del costo de materiales para concretos normales y cerca del 0.5% del costo de materiales en concretos autocompactables, dando como resultado que los costos por mano de obra en concretos normales son cuatro veces mayores que en los concretos normales. Entonces, si desciende la proporción que tiene la mano de obra en el costo total de los concretos puede hacer que los concretos autocompactables pierdan la mayor ventaja que tienen en costo sobre los concretos normales, ya que los costos de materiales en los concretos autocompactables son un 2.5% mayores que en los concretos normales. Dicho porcentaje debe ser compensado con el costo asociado a la mano de obra y a los ahorros obtenidos tanto en rendimiento de la mano de obra como a los ahorros generados por no tener que hacer tantos trabajos de acabados, para que sean rentables los concretos autocompactables.

Una cuestión importante que sale del análisis de los resultados obtenidos en el modelo económico, se relaciona con los cambios bruscos que sufrió la economía nacional y cómo se reflejaron en la diferencia entre concretos normales y autocompactables. En el periodo de estudio cuando se observó que el INPC y el INCEVIS tuvieron un cambio drástico en su tendencia el concreto normal fue la mejor opción en ese periodo, en gran medida por que los índices relacionados con la mano de obra no cambiaban al mismo ritmo que los conceptos relacionados con los materiales. Cuando las tasas de crecimiento se estabilizaron y hubo una recuperación en el índice de la mano de obra, la tendencia presentada se revierte y hace que el concreto autocompactable sea la mejor opción.

Ese comportamiento coincide con el comportamiento de los concretos ante los cambios de tendencia en el tipo de cambio de peso a dólar americano, ya que cuando se presentan cambios sustanciales de incremento en el tipo de cambio los concretos normales se presentaban como una mejor opción ya que no contienen una cantidad tan grande de aditivos. Por estas dos razones en un periodo que comprende aproximadamente desde agosto de 1999 hasta este año se observa que la mejor opción es el concreto autocompactable, en este periodo el tipo de cambio y el INPC se han mantenido con una tendencia de cambio constante y la remuneración a la mano de obra se ha incrementado.

Basado en el comportamiento identificado puedo afirmar que cuando exista una inestabilidad en el país se antoja que los concretos autocompactables no sean la mejor opción y de forma inversa, en periodos de calma se antoja que los concretos autocompactables sean la mejor opción.

Debido a la inestabilidad económica mostrada por nuestro país durante las últimas décadas es complicado asumir que para proyectos que tengan una duración muy grande se especifique el uso de concretos autocompactables. Como consecuencia, yo considero que los concretos autocompactables convienen en obras en las que los volúmenes de concreto que se empleen sean medianos a grandes, y su duración sea corta a mediana. En obras que requieran periodos largos y que utilicen concretos autocompactables, considero que debe existir un seguimiento constante del desempeño económico

de los concretos autocompactables y la posibilidad de usar concretos normales y concretos autocompactables indistintamente.

Es conveniente realizar un estudio más completo y con los conceptos particulares que requieran para la implementación de concretos autocompactables en un proyecto en particular y así poder tener un punto de vista mucho más crítico y de esta forma evitar las consideraciones arbitrarias que pueden alterar de manera importante la conveniencia de usar los concretos autocompactables.

Como resumen de los resultados obtenidos puedo concluir que los concretos autocompactables son una tecnología ya disponible que podría traer una cantidad importante de beneficios a nuestra sociedad en un futuro próximo y por tal motivo considero que se deben estudiar con mayor profundidad para poder explotar sus características al máximo y obtener una mayor cantidad de beneficios en su aplicación industrial. Creo que los concretos autocompactables son una alternativa especialmente buena en las siguientes condiciones:

- Zonas de acceso difícil,
- Restricciones de ruido,
- Requerimientos estrictos de acabado en elementos difíciles de colar.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES

Este trabajo tenía como objetivo poder conocer una nueva tecnología y evaluar su desempeño tanto físico como financiero para poder tener un criterio objetivo respecto de su posible utilización en México. Este objetivo lo cumplí y conjuntamente creo que tuve logros mucho más trascendentes e importantes que le dan mayor valor a este trabajo.

Una de las conclusiones más importantes que se desencadenan de este trabajo es que esta tecnología es viable para su uso en México. Considero que los concretos autocompactables pueden brindar a nuestra sociedad varios factores benéficos, ya que pueden generar ahorros y mejores productos finales lo que representará menores gastos porque la durabilidad que tendrán estos materiales será superior a la de concretos normales que tengan los mismos materiales constitutivos.

Me parece que por ser una tecnología que requiere un cierto conocimiento teórico y un cuidado especial en las características que tengan los materiales será difícil su penetración en el mercado nacional, pero no imposible. Me parece remarcable mencionar que creo que su uso estará limitado a las obras en las que se requiera un desempeño bueno del concreto para poder asegurar niveles de calidad elevados.

Otro factor que será crucial para que esta tecnología sea implementada en nuestro país se refiere a la diferencia de costos que exista entre los concretos normales y los concretos autocompactables ya que a pesar de poder generar ahorros a la larga, se puede generar una desconfianza de los resultados a obtener.

Existen varios factores que hacen atractivos a los concretos autocompactables, entre ellos la mejora en los tiempos de rendimiento del personal y la reducción de costos por trabajos de acabados entre otros. Considero que los concretos autocompactables serán más atractivos para el constructor si los costos relacionados con los aditivos disminuyen. Para que este fenómeno se genere, se requiere que exista un consumo mucho mayor de los aditivos para promover su fabricación nacional y de esta forma se abatan los costos innecesarios asociados a la transportación, mano de obra, etc. O bien, otra manera de lograr este objetivo sería estudiar la manera de actuar de estos químicos y sus componentes para poder encontrar alternativas de igual efectividad pero con un costo menor. Estas acciones aunque no garantizan que los aditivos del concreto sean más baratos, pueden ser un gran avance para lograr esta meta.

Debido a que los aditivos empleados para lograr los concretos autocompactables tienen un efecto únicamente en la trabajabilidad del concreto y no en las propiedades de los materiales se puede pensar que el comportamiento que tendrá una estructura construida de concreto autocompactable tendrá un desempeño estructural muy similar al presentado por una estructura construida con concreto normal.

Existen varios beneficios adicionales que no incorporé en la valuación económica planteada en el capítulo IV, que consiste en una disminución considerable del ruido generado al colocar el concreto. Esta disminución en el ruido producido en primera instancia nos da la posibilidad de poder proponer avances de obra mucho más agresivos en zonas urbanas, ya que al disminuir el ruido de colocación las molestias ocasionadas por trabajar en horarios nocturnos serían mucho menores. Un beneficio a largo plazo ligado a la disminución de ruido generado es la reducción de enfermedades asociadas a la exposición continua y reiterada a sonidos fuertes. Esta cuestión tomaría mayor relevancia si en un futuro se regulara con mayor exigencia las acciones laborales que puedan generar enfermedades a largo plazo.

Espero que en un futuro no muy lejano se piense en estudiar los posibles efectos a la salud atribuibles a la exposición continua a los aditivos utilizables para los concretos autocompactables ya que por su reciente aparición en los mercados es posible que aún no generen los efectos adversos que pudieran provocar.

Estos han sido los temas más relevantes que encontré a lo largo del desarrollo de este proyecto. Sinceramente espero que los concretos autocompactables sean una tecnología que supere las limitantes que le han impedido tener una aceptación mayor y que llegue a perdurar, ya que tienen un potencial importante para el beneficio de la humanidad.

## BIBLIOGRAFÍA.

Sección centro y sur de México del American Concrete Institute. Técnicos en pruebas de campo para concreto grado 1. México, D. F. Primera edición.

Adam M. Neville. Tecnología del concreto. IMCIC. México D.F. 1999. 1° edición.

D.P. Bentz, P.E. Stutzman, C.J. Haecker, y S. Remond, SEM/X-ray imaging of cement-based materials, Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Editores: H.S. Pietersen, J.A. Larbi, y H.H.A. Janssen, Delft University of Technology, Estados Unidos de Norteamérica, 1999. pp. 457-466.

T. C. Powers. The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste: its significance for concrete research and its method of determination. ASTM Bul. Estados Unidos de Norteamérica, 1949. Núm. 158.

T. C. Powers. A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. Proc. Highw. Res. Bd, 27, Washington DC, 1974, pp. 178-188

Varios. SP-159: International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand. Editorial American Concrete Institute, Editor Paul Zia. Estados Unidos de Norte América, 1994. pp 1-22, 31-44, 193-208, 265-282, 335-350.

Varios. SP-172: High Performance Concrete, Malaysia. Editorial American Concrete Institute. Editor V. M. Malhotra. Estados Unidos de Norte América, 1997. pp 57-66, 623-668.

Varios. SP-167: High Strength Concrete, An International. Editorial American Concrete Institute. Editor John A. Bickley. Estados Unidos de Norte América, 1995. pp 81-102.

Yves Malier. Les bétons à hautes performances. Editorial E & FN SPON. Primera reimpression 1994. pp 48-84, 379-392.

Varios. SP-154: Advances in concrete Technology, second CANMET-ACI international symposium. Editorial American Concrete Institute. Editor V. M. Malhotra. Estados Unidos de Norte América, 1995. pp 301-314, 381-398.

Varios. International Workshop on Self Compacting Concrete, Proceedings of the International Workshop on Self Compacting Concrete. Editorial American Concrete Institute. Editor V. M. Malhotra. Estados Unidos de Norte América, 1995. pp 301-314, 381-398.

Varios, Manual of the Proceedings of Self Compacting Concrete, RILEM. Estocolmo, Suecia 1998.

Dirección General de Investigación Económica, Banco de México. Índices de Precios, Cuaderno Mensual. Enero de 1990 a Enero 2001.

## PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS:

<http://www.astm.org/>  
<http://www.astm.org/FAQ/1.html>  
<http://www.astm.org/News/Mission2.html>  
<http://www.aci-int.org/>  
<http://www.aci-int.org/About ACI--Mission.htm>  
<http://www.nist.gov/>  
<http://ciks.cbt.nist.gov/phpct/database/images/>  
<http://infra.kochy-tech.ac.jp/sccnet/>  
<http://www.banxico.org.mx/>

# ANEXOS

## TABLAS DE CONVERSIONES PRÁCTICAS.

Unidad sistema pulgada-libra	Factor de conversión	Unidad sistema internacional
Pulgada	0.254	Metro
Pulgada cuadrada	6.452	Centímetros cuadrados
Pié cúbico	0.02832	Metro cúbico
Libra por pie cúbico	16.02	Kilogramo por metro cúbico
Libra por yarda cúbica	0.5933	Kilogramo por metro cúbico
Onza	29.57	Centímetros cúbicos (mililitro)
Cuarto de galón	0.9464	Decímetro cúbico (litro)
Libra	0.4536	Kilogramo
Ton	0.9072	Megagramo
Psi	6.895	Kilopascal
Psi	0.006895	Megapascal
Horsepower	745.7	Watt
Caloría por gramo	4.184	Kilojoule por kilogramo
Libra fuerza	4.448	Newton
Grados Fahrenheit	$(^{\circ}\text{F}-32)/1.8-273.3$	Grados Kelvin

Unidad sistema metro-kilogramo	Factor de conversión	Unidad sistema internacional
Kilogramos por centímetro cuadrado	0.0980665	MPa