



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **CONCRETOS DURABLES CON ALTO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE PARA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**JUAN CARLOS JACINTO AMBROCIO**

DIRECTOR DE TESIS:

**M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**



MÉXICO, D.F.

**2007**



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.

---

*"Educar no es dar carrera para vivir, sino templar el alma para las dificultades de la vida."*

## **DEDICATORIA**

### ***A mis padres:***

*La Sra. Micaela Ambrocio y el Sr. Luciano Jacinto. Por darme la vida y enseñarme a vivirla plenamente siempre por el camino correcto, para ustedes que predicán con el ejemplo toda mi admiración y cariño, ¡GRACIAS!...*

### ***A mis hermanos:***

*Verónica y Vicente. Por todo lo que hemos pasado, porque sin ustedes estaría perdido, ¡Siempre juntos!...*

### ***A mis sobrinos:***

*Arlet, niña linda. Por la alegría que agregaste a mi vida y que ahora con la llegada de tu hermanito(a) dicho sentimiento se verá incrementado, ¡Bendiciones!...*

### ***A la Facultad de Ingeniería de la UNAM:***

*Por todo lo que aprendí dentro y fuera de tus aulas.*

### ***A mi Director de Tesis:***

*M.I. Carlos Javier M. E. Por su confianza y conocimientos compartidos que me permitieron desarrollar este trabajo de Tesis.*

### ***Al Instituto de Ingeniería:***

*Por todo el apoyo proporcionado*

<b>ÍNDICE</b>	
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	iv
-----	
<b>ANTECEDENTES</b>	iv
-----	
<b>OBJETIVO</b>	viii
-----	
<b>ALCANCES</b>	viii
-----	
<b>CAPÍTULO I. REQUERIMIENTOS PARA EL CONCRETO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL</b>	<b>1</b>
<b>I.1 MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO</b>	<b>1</b>
-----	
<b>I.1.1 CEMENTANTES</b>	<b>1</b>
-----	
<b>I.1.1.1 CEMENTO PÓRTLAND</b>	<b>2</b>
-----	
<b>I.1.1.1.1 CEMENTO PÓRTLAND UTILIZADO</b>	<b>3</b>
-----	
<b>I.1.1.2 CENIZA VOLANTE (FLY ASH)</b>	<b>5</b>
-----	
<b>I.1.1.2.1 CENIZA VOLANTE EMPLEADA</b>	<b>5</b>
-----	
<b>I.1.1.2.1.1 ANÁLISIS DEL CARBÓN</b>	<b>6</b>
-----	
<b>I.1.1.2.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS PUZOLANAS</b>	<b>7</b>
-----	
<b>I.1.2 AGREGADOS PÉTREOS</b>	<b>7</b>
-----	
<b>I.1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS</b>	<b>7</b>
-----	
<b>I.1.2.2 GRANULOMETRÍA</b>	<b>8</b>
-----	
<b>I.1.2.2.1 AGREGADO FINO (ARENA)</b>	<b>8</b>
-----	
<b>I.1.2.2.2 AGREGADO GRUESO (GRAVA)</b>	<b>8</b>
-----	
<b>I.1.2.3 FINOS INDESEABLES (LIMO Y ARCILLA)</b>	<b>9</b>
-----	
<b>I.1.2.4 DENSIDAD</b>	<b>9</b>
-----	
<b>I.1.2.5 ABSORCIÓN Y POROSIDAD</b>	<b>9</b>
-----	
<b>I.1.2.6 AGREGADOS PÉTREOS UTILIZADOS</b>	<b>9</b>
-----	
<b>I.1.2.6.1 PROPIEDADES FÍSICAS</b>	<b>10</b>
-----	
<b>I.1.3 AGUA</b>	<b>11</b>
-----	
<b>I.1.4 ADITIVOS PARA CONCRETO</b>	<b>12</b>
-----	
<b>I.1.4.1 ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA</b>	<b>13</b>
-----	
<b>I.2 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO</b>	<b>15</b>
-----	
<b>I.2.1 MASA VOLUMÉTRICA</b>	<b>16</b>
-----	
<b>I.2.2 TEMPERATURA</b>	<b>16</b>
-----	
<b>I.2.3 AIRE INCLUIDO</b>	<b>17</b>
-----	
<b>I.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO</b>	<b>18</b>
-----	
<b>I.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE</b>	<b>18</b>
-----	
<b>I.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON</b>	<b>19</b>
-----	
<b>I.3.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA</b>	<b>20</b>
-----	
<b>I.3.4 CAMBIOS VOLUMÉTRICOS (CONTRACCIÓN POR SECADO)</b>	<b>22</b>
-----	
<b>I.3.5 DURABILIDAD</b>	<b>23</b>
-----	
<b>I.3.5.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO</b>	<b>26</b>
-----	
<b>I.3.5.2 RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS</b>	<b>28</b>
-----	

<b>CAPÍTULO II. CONCRETOS CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE</b>	<b>30</b>
II.1 CENIZA VOLANTE	30
II.1.1 ORIGEN	30
II.1.2 TIPOS DE CENIZA VOLANTE	31
II.1.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	32
II.1.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	33
II.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONCRETOS CON CENIZA VOLANTE COMO SUSTITUTO PARCIAL DE CEMENTO PÓRTLAND	35
II.2.1 CONCRETO TÍPICO	35
II.2.2 PARTICULARES DEL CONCRETO	36
II.3 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE	37
II.3.1 VENTAJAS EN EL CONCRETO	37
II.3.1.1 EN ESTADO FRESCO	38
II.3.1.2 EN ESTADO ENDURECIDO	38
II.3.2 VENTAJAS ECONÓMICAS Y AMBIENTALES	39
 <b>CAPÍTULO III. PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO</b>	 <b>43</b>
III.1 CONSIDERACIONES GENERALES	44
III.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA	44
III.2 DISEÑO DEL PROPORCIONAMIENTO	45
III.2.1 FABRICACIÓN DEL CONCRETO	46
III.2.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO FABRICADO EN ESTADO FRESCO	49
III.2.2.1 MASA VOLUMÉTRICA	50
III.2.2.2 CONTENIDO DE AIRE	51
III.2.2.3 CONSISTENCIA (REVENIMIENTO)	53
 <b>CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS FABRICADOS CON CEMENTO PÓRTLAND Y CENIZA VOLANTE</b>	 <b>55</b>
IV.1 RESISTENCIA MECÁNICA	55
IV.1.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	55
IV.1.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA	62
IV.1.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD ( $E_C$ ) Y RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )	65
IV.1.4 CONTRACCIÓN POR SECADO	68
IV.2 DURABILIDAD	72
IV.2.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO	72
IV.2.2 RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS	75

---

<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	79
V.1 CONCLUSIONES	79
V.2 RECOMENDACIONES	87
<b>REFERENCIAS</b>	90
<b>APÉNDICES</b>	92
APÉNDICE 1	93
APÉNDICE 2	99
APÉNDICE 3-1	105
APÉNDICE 3-2	109

# INTRODUCCIÓN

El término vivienda ha sido ampliamente debatido tanto en los círculos académicos como entre los encargados de implementar las políticas públicas. Las ideas van desde los cuestionamientos a las implicaciones éticas y morales de lo que se debe considerar “vivienda digna” hasta las de carácter operativo, que se refieren a cómo registrar el inmueble llamado vivienda.



Cuando el ser humano superó la época de las cavernas, aplicó un mayor esfuerzo en delimitar su espacio vital, edificando construcciones para resguardo propio o con propósitos sociales y/o religiosos. Las características físicas de una casa dependerán del clima, del terreno, de los materiales disponibles y de las técnicas constructivas alcanzadas. Desde la antigüedad se ha utilizado para las edificaciones una mezcla de dos componentes primordiales: *agregado* y *pasta cementante*, que hoy conocemos como concreto (*del latín concretus que significa "crecer unidos" o "unir"*), que en la actualidad se ha convertido en el producto artificial más utilizado en el mundo. ¿Pero desde cuándo surgió esta mezcla?

## ANTECEDENTES

En cuanto al origen del concreto, los historiadores nos remontan a los babilonios, quienes utilizaban una mezcla a base de arcilla similar al concreto y a los egipcios que empleaban un mortero (mezcla de arena con materia cementante) para unir bloques y lozas de piedra al erigir sus asombrosas construcciones, fomentando también el descubrimiento del mortero de cal y de yeso como conglomerante<sup>1</sup> para construir las pirámides.

Aunque, serían los romanos (*Fig. 1*) los descubridores de la tecnología de los materiales llamados “puzolánicos”, para producir sus cementos, ellos utilizaban una mezcla de cal con cenizas que provenían de un lugar llamado Pozzuoli, ubicado en la bahía de Nápoles, Italia. Lamentablemente el arte de este concreto se perdió después de la caída del imperio romano.

<sup>1</sup> Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos.



**Fig. 1 La antigua Roma**

La forma del concreto como hoy lo conocemos se la debemos al ingeniero británico John Smeaton (1724-1792) quien en 1756 implementó el uso del cemento en el concreto. Los ingredientes utilizados en su creación incluyeron cantos rodados (guijarros) y ladrillo pulverizado como agregado.

La siguiente evolución importante en la creación del concreto, surgió en 1824, año en que el inglés Joseph Aspdin (1778-1855) patentó uno de los componentes básicos para la elaboración del concreto actual: el cemento Pórtland, el cual es un material semejante a una caliza natural que se explotaba en la Isla de Pórtland, Inglaterra, de donde obtiene su nombre.

A partir de ese momento, el concreto de cemento Pórtland ha emergido claramente como el material de elección para la construcción de un gran número y variedad de estructuras en el mundo actual. Esto se atribuye principalmente al bajo costo de los materiales, así como al bajo costo de mantenimiento.

El concreto debe satisfacer los requisitos que permitan al elemento constructivo cumplir con la función para la cual fue diseñado. Una buena ingeniería define con precisión la función del elemento por diseñar y complementa su dimensionamiento con los requisitos que deben cumplir los materiales que lo compondrán. Una vez definidas las necesidades, se les asigna a los productos los requisitos significativos por cumplir. A estos requisitos se les conoce como especificaciones.

La fabricación de un buen concreto es resultado de varios factores, incluso puede ser sólo cuestión de buena suerte, sin embargo, en general para la obtención de buenas propiedades como la durabilidad (por muchos años), lejos de ser trivial está ligada al dominio del proceso. Es por ello que, durante los últimos 60 años el estudio de la fabricación y utilización del cemento Pórtland se ha atendido con enfoques cada vez menos empíricos y más científicos.

Muchos de los avances en la tecnología del concreto han ocurrido como resultado de dos fuerzas impulsoras: la velocidad de construcción y la durabilidad del concreto. Se han alcanzado desarrollos importantes que han revolucionado a la industria de la construcción, entre éstos, dos son de gran importancia:

- ⊖ Uno de ellos es el descubrimiento de los aditivos reductores de agua de alto rango (superfluidificantes), desarrollados y comercializados en la década de los setenta, los cuales hoy en día siguen modificándose para mejorar las propiedades reológicas de los concretos.
- ⊖ Mientras que el otro, es la aparición de los Concretos con Alto Consumo de Ceniza Volante (HVFA = High Volume Fly Ash). Hoy en día, los materiales reciclados están llegando a ser cada vez más populares como ingredientes en el concreto debido a una conciencia pública más alta sobre la sustentabilidad ecológica y daño ambiental.

La utilización de este residuo (ceniza volante) en la construcción ha ayudado a solucionar algunos problemas del tipo ambiental, esto debido a que el comportamiento ambiental del concreto puede realizarse considerablemente si la tasa de utilización de ceniza volante por parte de la industria del concreto se acelera en los países productores de ceniza. Además de que al utilizar este método, se reducen los costos de los materiales empleados en este campo.

Siendo así que, además de la velocidad de construcción y la durabilidad, ahora existe una tercera fuerza impulsora a saber: el favorable comportamiento ambiental de los materiales para el futuro, que cada vez está adquiriendo mayor importancia en la valoración tecnológica.

En la actualidad, la producción anual de ceniza volante en el mundo es del orden de 450 millones de toneladas. Y únicamente cerca de 25 millones de toneladas, es decir, 6 por ciento del total de ceniza volante disponible, se está usando como una puzolana en cementos Pórtland mezclados o en mezclas de concreto (P. Kumar Mehta, 1999). Sería conveniente utilizar este tipo de concretos para combatir algunos de los problemas ambientales que nos aquejan en la actualidad y con su implementación se podría ayudar a solucionar otro gran problema que hoy en día tiene el país, el problema de la vivienda.

La carencia de vivienda en México ha dado lugar a inequidades entre los diferentes grupos sociales, así como al surgimiento y proliferación de asentamientos irregulares alrededor de las ciudades, los cuales constituyen un peligro latente para sus ocupantes, propiciando el crecimiento desmedido de los centros urbanos, y aumentando los rezagos en infraestructura urbana y de servicios.

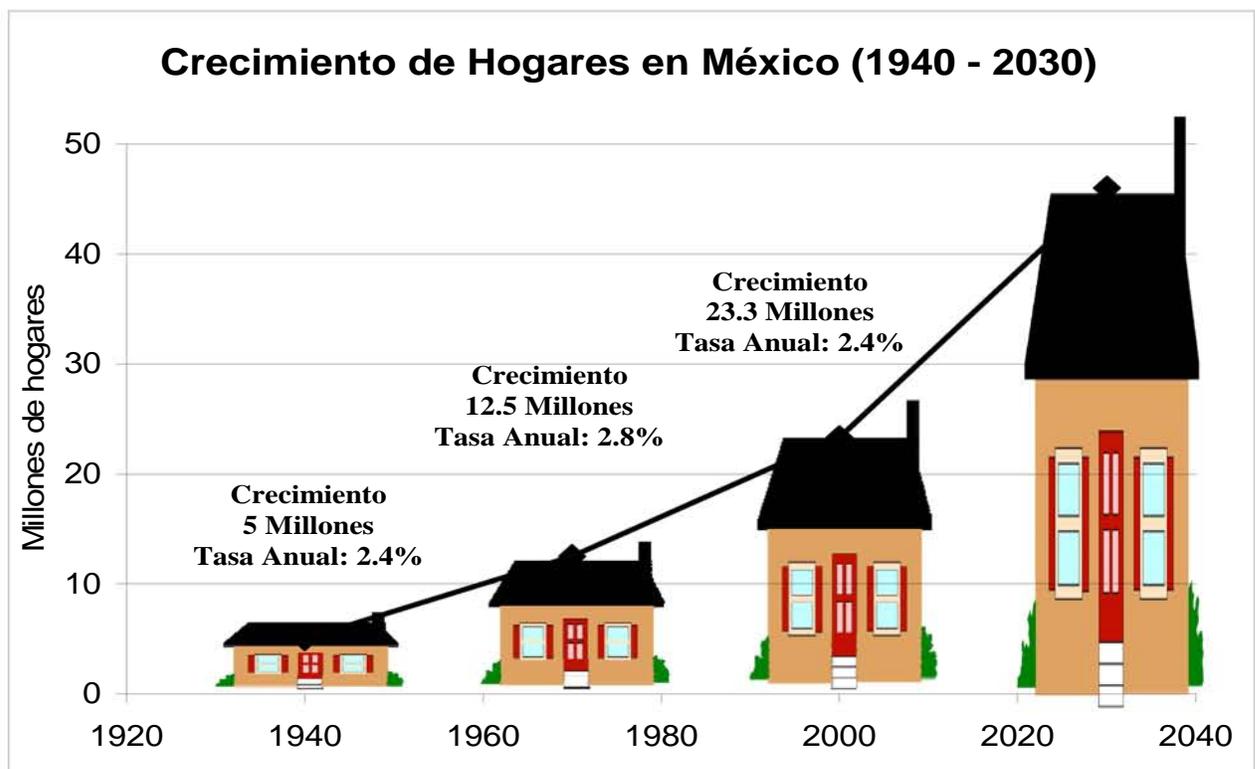
En este sentido, las necesidades habitacionales han ido cobrando dinamismo prácticamente al ritmo del crecimiento del proceso de urbanización del país, íntimamente ligado al de su industrialización, hasta convertirse en un problema emergente.

Al hablar de la relación existente entre crecimiento económico y desarrollo social, la vivienda debe ser considerada como uno de sus principales elementos articuladores, sin embargo, el acelerado proceso de modernización de la sociedad, no ha ido acompañado de un incremento homogéneo del nivel de bienestar de los ciudadanos, al no ofrecer igualdad de oportunidades para todos los mexicanos.

Según datos del *Consejo Nacional de Vivienda (CONAVI)*, La tendencia poblacional, llevará un crecimiento explosivo en la formación de nuevos hogares a lo largo de los próximos años, ya que la proporción de la población en edad de formar un hogar, y por consiguiente de requerir vivienda estará en constante crecimiento.

Además de las necesidades de vivienda generada por la creación de nuevos hogares, también es importante considerar el rezago habitacional actual derivado de tres aspectos: déficit actual generado por familias que no tienen una casa independiente, las casas que necesitan sustituirse y aquellas que requieren ampliarse o repararse.

En el marco de la demografía actual (2007), se estima que para el año 2030 en nuestro país se construirán 18.4 millones de hogares adicionales para alcanzar un total de 46 millones (*Fig. 2*), lo que representa un crecimiento anual promedio de 800,000 hogares. Esto significa que para el año 2010, a nivel nacional existirán casi 30 millones de hogares.



**Fig. 2** Tendencia en la demanda de hogares para el año 2030, fuente CONAVI

## OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo de investigación es el de diseñar y fabricar concretos con alto consumo de ceniza volante (**HVFA**, por sus siglas en inglés) y compararlos con concretos semejantes que no cuenten con la inclusión de esta ceniza (**testigo**), además de verificar que el concreto con ceniza volante cumpla con las normas vigentes para la construcción de viviendas en la Ciudad de México y su área metropolitana, así como con las normas internacionales. De esta manera, colaborar en el apoyo de su implementación en la construcción de este tipo de edificaciones.

Las pruebas como: Resistencia a la compresión, resistencia a la tensión indirecta, modulo elástico, relación de Poisson, contracción por secado, permeabilidad al ión cloruro y resistencia a los sulfatos, serán verificadas en el laboratorio de conformidad con las *Normas Mexicanas* (NMX), el *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (RCDF) y sus *Normas Técnicas Complementarias* (NTC), el *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación* (ONNCCE), o extranjeras como la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) y/o el *American Concrete Institute* (ACI).

La investigación tiene la finalidad de explorar la posibilidad de conseguir un incremento en la vida útil de la vivienda de interés social, a la vez busca reducir costos en la producción de este tipo de hogares, que como se sabe, están dirigidos a la clase media-baja del país, además de ser la que tiene la mayor carencia y mayor número de consumidores potenciales. Si a todo esto se le agregan los beneficios ambientales que conlleva la creación de este tipo de concretos, se considera más que suficiente la justificación de este trabajo.

## ALCANCES

- ⊗ Esta investigación está dirigida primordialmente a la utilización de concretos con alto consumo de ceniza volante en la construcción de viviendas de interés social, sin embargo, esto no restringe su uso en otro tipo de edificaciones.
- ⊗ El trabajo a realizar tendrá el carácter comparativo-propositivo.
- ⊗ Se espera obtener un resultado similar o, inclusive, una mejora en comparación con los concretos para vivienda utilizados actualmente.

## CAPÍTULO I

### REQUERIMIENTOS PARA EL CONCRETO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

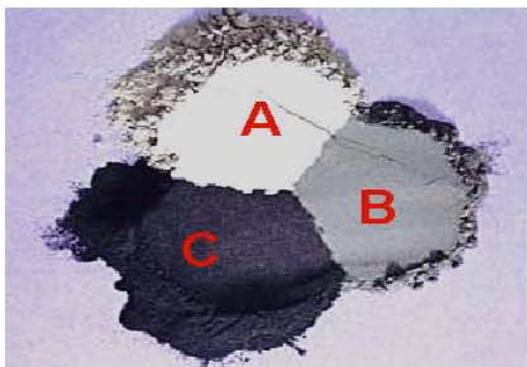
Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad para cumplir con los requerimientos de diseño de la estructura, siendo la resistencia a la compresión del concreto la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar los diferentes tipos de estructuras.

Los concretos que se emplean en la construcción de unidades habitacionales son de baja resistencia mecánica ( $150\text{-}200\text{ kg/cm}^2$ ) en los que los consumos de cemento Pórtland son reducidos; además, por lo regular se utilizan elementos estructurales con secciones transversales relativamente pequeñas, en los que el recubrimiento del acero es escaso. Aunque la capacidad de carga de esas estructuras se satisface con la práctica adoptada, los aspectos de durabilidad distan mucho de ser satisfechos. Muchas de las unidades habitacionales se construyen en zonas con ambientes particularmente agresivos sin que se tomen medidas especiales para protegerlas de la acción deteriorante de los sulfatos y los cloruros. Una solución de bajo costo a este problema puede ser el empleo de concretos con altos consumos de ceniza volante.

#### I.1 MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO

Los concretos de baja resistencia se producen con materiales de calidad normal y consumos óptimos de cementante. Estos materiales se dosifican, mezclan, colocan, compactan y curan de manera convencional. Tienen una relación agua/materiales-cementantes que varía de 0.86 a 0.95. Se usan aditivos plastificantes de rango normal y medio para disminuir la cantidad de agua y aumentar el revenimiento.

##### I.1.1 CEMENTANTES



**Fig. I.1** Algunos tipos de cementantes:  
A) Cemento Pórtland, B) Ceniza volante,  
C) Escoria granulada

Son materiales aglomerantes que tienen las propiedades de adherencia y cohesión requeridas para unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida continua, de resistencia y durabilidad adecuadas. Los materiales cementantes (*Fig. I.1*) incluyen a la escoria granulada de alto horno molida, al cemento natural, a la cal hidráulica hidratada, a la ceniza volante y a las combinaciones de estos y de otros materiales. Los materiales cementantes utilizados en el proyecto fueron el cemento Pórtland y la ceniza volante.

### I.1.1.1 CEMENTO PÓRTLAND

Los cementos Pórtland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, esto es, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. En el curso de esta reacción, denominada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una pasta, y cuando le son agregados arena y grava triturada, se forma lo que se conoce como concreto.

La hidratación inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua; el endurecimiento de la mezcla generalmente comienza a las tres horas, y el desarrollo de la resistencia se logra a lo largo de los primeros 30 días, aunque éste continúa aumentando muy lentamente por un período mayor de tiempo.

En la *tabla I.1* se muestran la clasificación de los cementos mexicanos reglamentados bajo la norma **NMX-C-414-ONNCCE**, y en el estándar internacional bajo las normas **ASTM-C-150** “Standar Specification for Pórtland Cement” (Especificación Estándar para Cementos Pórtland) y **ASTM-C-595** “Standar Specification for Blended Hydraulic Cements” (Especificación Estándar para Cementos Hidráulicos Mezclados).

**Tabla I.1 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS MEXICANOS**

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistencia a los Sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado
TPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Pórtland con humo de Sílice	40 R	---
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	---	---

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2003

La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 en Newton por milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>) como se señala en la *tabla 1.2* de las normas mexicanas.

**TABLA I.2 ESPECIFICACIONES FÍSICAS**

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A COMPRESIÓN, N/mm <sup>2</sup>			TIEMPO DE FRAGUADO, min.		ESTABILIDAD DE VOLUMEN EN AUTOCLAVE, %	
	3 DÍAS	28 DÍAS		INICIAL	FINAL	EXPANSIÓN	CONTRACCIÓN
	MÍNIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÁXIMO	MÁXIMO
20	---	20	40	45	600	0.80	0.20
30	---	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	---	40	---	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	---	45	600	0.80	0.20

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2003

### I.1.1.1 CEMENTO PÓRTLAND UTILIZADO

El tipo de cemento que se empleó es un Cemento Pórtland Ordinario **CPO 30 R** cuyos componentes deben estar integrados conforme a la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE (*Tabla 1.3* y *Tabla 1.4*). Donde la letra R indica que el cemento debe cumplir con una resistencia inicial especificada a la edad de 3 días.

**TABLA I.3 COMPOSICIÓN DEL CEMENTO UTILIZADO**

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					minoritarios <sup>(1)</sup>
		Principales					
		Clinker Pórtland + Yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales Puzolánicos <sup>(2)</sup>	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5

(1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales de la tabla

(2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes

**TABLA I.4 ESPECIFICACIONES MECÁNICAS Y FÍSICAS**

Clase resistente	Resistencia a compresión						Tiempo de fraguado (min.)		Estabilidad de Volumen en autoclave (%)	
	3 días		28 días				Inicial	Final	Expansión	Contracción
	mínimo		Mínimo		máximo		mínimo	máximo	máximo	máximo
	(N/mm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )				
30 R	20	204	30	306	50	510	45	600	0.8	0.2

Por su composición química (*Tabla I.5*), el cemento Pórtland CPO 30R genera menor calor de hidratación que sus similares, con lo que se disminuye notablemente la formación de fisuras y lo hace resistente al ataque moderado de agentes agresivos del agua y del suelo, principalmente de sulfatos y salitre. En la elaboración de concreto se tiene mayor rendimiento, durabilidad y resistencias más elevadas que las obtenidas con cementos convencionales, lo que significa una mayor economía, además de ser un cemento comercial.

**TABLA I.5 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CEMENTO, ESTUDIO REALIZADO POR EL LABORATORIO DEL (IMCYC) EN BASE A LA NORMA ASTM-C-150**

	Parámetro	Cemento Pórtland CPO 30R
Análisis Químico	SiO <sub>2</sub> – Dióxido de silicio	% 19.2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Óxido de aluminio	% 5.3
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Óxido de hierro	% 3.2
	CaO – Cal combinada	% 62.9
	CaO – Cal libre	% 0.3
	MgO – Magnesio	% 1.2
	SO <sub>3</sub> – Trióxido de azufre	% 3.1
	Residuo insoluble	% 0.77
	Perdida por calcinación	% 3.0
	<b>suma</b>	<b>98.97</b>
	Na <sub>2</sub> O – Óxido de sodio	% 0.32
	K <sub>2</sub> O – Óxido de potasio	% 0.47
	Total de álcalis (Na <sub>2</sub> O + 0.658 x K <sub>2</sub> O)	% 0.63
Compuestos potenciales	C <sub>3</sub> S – Silicato tricálcico	% 63.38
	C <sub>2</sub> S – Silicato dicálcico	% 7.37
	C <sub>3</sub> A – Aluminato tricálcico	% 6.90
	C <sub>4</sub> AF – Ferr alum tetracálcico	% 15.50
	<b>Suma</b>	<b>93.15</b>

### I.1.1.2 CENIZA VOLANTE (FLY ASH)

Debido a sus características puzolánicas, las cenizas volantes son utilizadas como reemplazo del cemento de Pórtland en el concreto. Llegando a sustituir hasta el 50% de la masa del cemento Pórtland.

Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben tener conformidad con la norma **ASTM-C-618** "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete" (*Especificación Estándar para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural Cruda o Calcinada para su Uso en Concreto*).

#### I.1.1.2.1 CENIZA VOLANTE EMPLEADA

La ceniza volante que se empleó es de la **Clase F<sup>1</sup>**, las cenizas volantes de clase F, normalmente son un producto de la combustión de carbón de antracita ó de carbón bituminoso. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.

La ceniza Proviene de la carboeléctrica *Río Escondido (José López Portillo)* que la CFE tiene en Nava, Coahuila México (*Fig. I.2*), donde se tienen cuatro unidades generadoras de electricidad con una capacidad efectiva instalada de 1,200 MW y que entró en operación en septiembre de 1982.



**Fig. I.2** Carboeléctrica CFE Nava, Coahuila

<sup>1</sup> la ceniza mexicana está considerada dentro de la clase o tipo F

### I.1.1.2.1.1 ANÁLISIS DEL CARBÓN

A continuación se presentan los resultados de Laboratorio Químico del Carbón, realizados por la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

ANÁLISIS PRÓXIMO O PRIMARIO			
	Como se recibe	Base seca	
% Humedad	2.66	---	
% Materia volátil	24.99	25.67	
% Carbón fijo	34.08	35.01	
% Cenizas	38.27	39.32	
ANÁLISIS DE FUSIBILIDAD DE LA CENIZA			
	ATMÓSFERA		
Temperaturas	Oxidante °C	Reductora °C	
Inicial	1470	1436	
Suavizante	1489	1452	
Hemisférica	1497	1472	
Fluidización	1512	1492	
ANÁLISIS ELEMENTAL			
	Como se recibió	Base seca	
% Carbono	46.77	48.05	
% Hidrogeno	3.90	3.70	
% Nitrógeno	1.12	1.15	
% Azufre	1.28	1.34	
% Oxigeno	6.66	6.47	
% Ceniza	38.27	39.32	
ANÁLISIS MINERALÓGICO			
% SiO <sub>2</sub>	62.25	% MgO	0.91
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.74	% K <sub>2</sub> O	1.15
% TiO <sub>2</sub>	0.79	% Na <sub>2</sub> O	0.38
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.68	No Determinados	1.21
% CaO	2.89		

### I.1.1.2.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS PUZOLANAS

Estudio realizado por el Laboratorio de Cemento del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) en base a la norma **ASTM-C-618**.

Requerimientos Químicos	Resultados obtenidos	Especificación ASTM-C-618		
	%	Clase F %	Clase N %	Clase C %
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min %	<b>92.2</b>	70	70	50
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), max %	<b>0.2</b>	5.0	4.0	5.0
Pérdida por calcinación, max %	<b>2.9</b>	6.0	10.0	6.0
Humedad, max %	<b>0.5</b>	3.0	3.0	3.0
Álcalis disponibles (Na <sub>2</sub> O), max %	<b>3.7</b>	1.5	1.5	1.5

## I.1.2 AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados deben satisfacer normas para su uso óptimo en ingeniería: deben ser partículas limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

### I.1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS

A continuación se mencionan las clasificaciones más comunes que se emplean para este tipo de materiales:

- Clasificación por Origen
- Clasificación por Composición
- Clasificación por Color
- Clasificación por Tamaño de Partículas
- Clasificación por Modo de Fragmentación
- Clasificación por Peso Específico

## I.1.2.2 GRANULOMETRÍA

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices, norma **ASTM-C-136** “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*” (*Método de Ensaye Estándar para el Análisis de Tamices de Agregados Finos y Gruesos*).

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.

### I.1.2.2.1 AGREGADO FINO (ARENA)

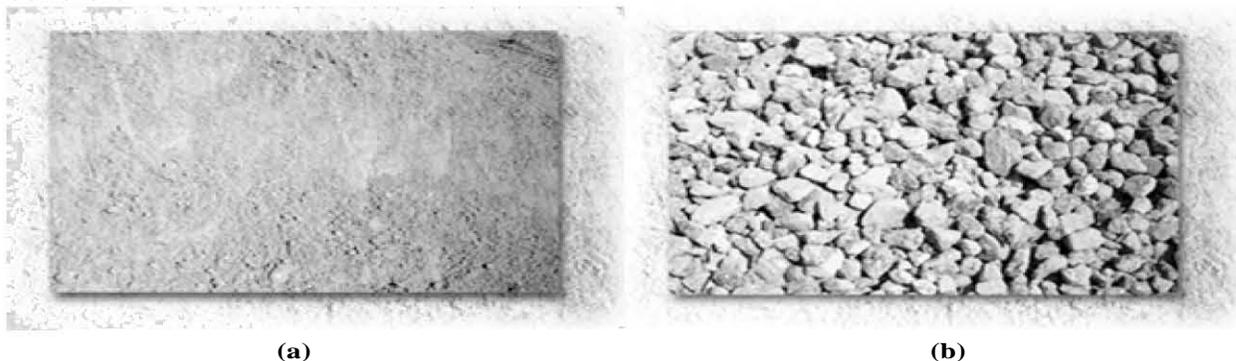
Constituido nominalmente por partículas cuyo tamaño está entre 0.075 y 4.75 mm, en donde es deseable que exista continuidad granulométrica, es decir que exista presencia de todos los tamaños representantes de las diferentes fracciones que están establecidas.

Es importante comentar que si bien es útil que el agregado fino (*Fig. 1.3.a*) cumpla con la continuidad granulométrica, resulta poco prudente el especificar la arena con base a esta característica, ya que un adecuado diseño de mezclas o bien el uso de aditivos en el concreto, permite disminuir los posibles efectos no deseados por una deficiencia de esta característica del agregado.

### I.1.2.2.2 AGREGADO GRUESO (GRAVA)

Agregado que queda en el intervalo nominal comprendido desde 4.75 mm hasta la dimensión máxima que contenga el concreto, magnitud que define el Tamaño Máximo del Agregado (TMA) en cada caso. Al igual que en el agregado fino, es deseable que exista una continuidad granulométrica de la fracción. Por lo anterior, es claro que el límite superior del agregado grueso (*Fig. 1.3.b*) es el que rige la curva granulométrica a especificar para cada tipo de concreto, de acuerdo con sus necesidades constructivas.

De igual forma que en el agregado fino, los efectos por una deficiente composición granulométrica pueden ser disminuidos, vía la aplicación adecuada de la tecnología del concreto.



**Fig. I.3** Agregados Pétreos de origen Andesítico

### I.1.2.3 FINOS INDESEABLES (LIMO Y ARCILLA)

TABLA I.6 EN FORMA GENERAL, PARA LA ESPECIFICACIÓN DE ESTA CARACTERÍSTICA HAY DOS CRITERIOS PARA LA UTILIZACIÓN DE AGREGADOS EN CONCRETOS

Finos que pasan la malla No. 200	norma aplicada NMX-C-111*	
	Arena (%)	Grava (%)
Finos de cualquier tipo	5.0	2.0
Finos sin arcilla**	10.0	3.0

\* % máximo aplicable

\*\* Para conocer el carácter arcilloso de los finos que pasan la malla No. 200, es aplicable la prueba de equivalente de arena

### I.1.2.4 DENSIDAD

No hay una especificación sobre los límites de aceptación para esta característica, principalmente porque no tiene correlación con el grado de sanidad de los materiales que se analizan. Además, depende del peso unitario del concreto que se va a producir, dividiéndose para ello en ligero, normal y pesado.

### I.1.2.5 ABSORCIÓN Y POROSIDAD

No hay una especificación sobre el límite de aceptación de esta característica, dado que esta depende de muy diversos factores, tales como: contenido de finos, forma y textura superficial de las partículas, porosidad de la roca y distribución granulométrica. Se reconoce como información válida, sin embargo, cuando se tienen rocas de buena calidad física y los agregados cumplen las otras especificaciones que se le solicitan, el agregado grueso no rebasa el 3% de la absorción, así como el agregado fino no supera el 5% máximo.

### I.1.2.6 AGREGADOS PÉTREOS UTILIZADOS

Por el carácter económico que requieren los concretos para la vivienda de interés social, los agregados pétreos utilizados son los que se encuentran en el Valle de México. Estos provienen de la planta de concreto de *Grupo SADASI S.A.* en “Los héroes Tecámec”, Tecámec, Estado de México. Son de origen ígneo, agregado grueso y fino andesítico.

### I.1.2.6.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Con el objetivo de determinar las propiedades físicas de los agregados pétreos, requeridos para el proporcionamiento de las mezclas, se les hicieron ensayos de laboratorio como: granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico seco suelto y compacto.

Las propiedades físicas tanto del agregado fino como del agregado grueso utilizados se presentan en la *tabla 1.7* y en la *tabla 1.8* respectivamente.

**TABLA I.7 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO FINO**

Propiedad	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Módulo de finura	2.68	2.66	<b>2.67</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	2.37	2.39	<b>2.38</b>
Absorción, %	6.47	6.81	<b>6.64</b>
Pasa malla #200, %	17.94	19.22	<b>18.58</b>
P.V.S.S., kg/m <sup>3</sup>	1495	1508	<b>1502</b>
P.V.S.C., kg/m <sup>3</sup>	1655	1637	<b>1646</b>

Debido a que la arena tuvo más de 5% de finos (Norma NMX-C-111). El exceso de finos en la arena tendrá repercusión en el consumo de agua, pero no se cambiaron sus características debido a que así se emplea en la construcción de vivienda.

**TABLA I.8 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO 19 mm (3/4")**

Propiedad	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Módulo de finura	4.88	4.99	<b>4.94</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	2.34	2.38	<b>2.36</b>
Absorción, %	5.08	4.67	<b>4.87</b>
P.V.S.S., kg/m <sup>3</sup>	1296	1293	<b>1294</b>
P.V.S.C., kg/m <sup>3</sup>	1384	1426	<b>1405</b>

**NOTA:** las pruebas físicas, incluyendo curvas granulométricas, se presentan en el APÉNDICE 1

### I.1.3 AGUA

En el caso del agua que se emplea en la fabricación de concreto, se considera que puede tener dos funciones principales en el proceso; la primera como agua de mezclado y la segunda como agua de curado. Ambas funciones son evaluadas por la norma **NMX-C-122** (Tabla I.9), estableciendo los parámetros que deben cumplir las aguas no potables, así como una clasificación de los diversos tipos de agua que existen y sus efectos y limitaciones para ser usadas en concreto.

Cuando el agua funciona como un ingrediente en la fabricación de concreto, es decir como agua de mezclado, se puede estimar que el agua ocupa entre el 10 y 25 por ciento de cada metro cúbico de concreto que se fabrica.

**TABLA I.9 CLASIFICACIÓN DEL AGUA**

Tipo de agua	Efectos con su uso en concreto
Aguas puras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acción disolvente e hidrolizante de compuestos cálcicos del concreto.</li> </ul>
Aguas ácidas naturales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disolución rápida de los compuestos del cemento.</li> </ul>
Aguas fuertemente salinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interrumpe las reacciones del fraguado de cemento.</li> <li>• En el curado, disolución de los componentes cálcicos del concreto.</li> </ul>
Aguas alcalinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce acciones nocivas para cementos diferentes al aluminoso.</li> </ul>
Aguas sulfatadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son agresivas para concretos fabricados con cemento Pórtland, en especial al tipo I.</li> </ul>
Aguas cloruradas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce una alta solubilidad de la cal.</li> <li>• Produce disolución en los componentes del concreto.</li> </ul>
Aguas magnesianas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tienden a fijar la cal, formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble.</li> <li>• En la mezcla, inhibe el proceso de fraguado del cemento.</li> </ul>
Agua de mar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce eflorescencias.</li> <li>• Incrementa la posibilidad de generar corrosión del acero de refuerzo.</li> </ul>
Aguas recicladas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El concreto puede acusar los defectos propios del exceso de finos.</li> </ul>
Aguas industriales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por su contenido de iones sulfato, ataca cualquier tipo de cemento.</li> </ul>
Aguas negras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos imprevisibles.</li> </ul>

FUENTE: NMX-C-122-ONNCE

La calidad del agua es de importancia ya que las impurezas excesivas en el agua no solo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

Para verificar la calidad del agua y saber si se puede usar para fabricar concreto, se hacen unos cubos de mortero, norma **ASTM-C-109**; los cubos producidos con ella deberán alcanzar una resistencia a los siete días de al menos 90% de la obtenida con especímenes fabricados con agua potable o destilada.

Para la fabricación de los concretos de estudio, el agua utilizada fue la del sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria. Al agua no se le hicieron determinaciones para evaluar el contenido de impurezas, debido a que no existe duda sobre que ésta sea la idónea para producir concreto.

### I.1.4 ADITIVOS PARA CONCRETO

Definiciones de Aditivo:

Es un material distinto del agua, los agregados o el cemento hidráulico, que se utiliza como ingrediente del mortero o concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o después del mezclado<sup>2</sup>.

Ingredientes que se agregan al concreto o mortero inmediatamente antes o durante el proceso de mezclado y que no son agua, agregados, cemento hidráulico, o fibras de refuerzo<sup>3</sup>.

**TIPOS DE  
ADITIVOS  
SEGÚN LA  
NORMA  
ASTM C494**

- **Tipo A** Reductor de Agua
- **Tipo B** Retardante (fraguado)
- **Tipo C** Acelerante (fraguado)
- **Tipo D** Reductor Retardante
- **Tipo E** Reductor Acelerante
- **Tipo F** Reductores de Alto Rango
- **Tipo G** Reductores de Alto Rango Retardante

<sup>2</sup> ASTM C-125

<sup>3</sup> ACI 116.R-2

### I.1.4.1 ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

Aditivo que incrementa el revenimiento del concreto o mortero fresco sin incrementar el contenido de agua o que mantiene el revenimiento con una cantidad menor de agua, mediante factores ajenos a la incorporación de aire<sup>4</sup>.

Este tipo de aditivo (Pozzolith 322N) fue el empleado en el estudio. Se utilizó la cantidad de aditivo requerida para disminuir el contenido de agua para obtener un revenimiento entre 10 y 15 cm.

#### BENEFICIOS

##### Propiedades del Concreto Fresco:

- Disminución de la relación a/c
- Mejora de la trabajabilidad, habilidad de bombear, acabado y colocación del concreto
- Afecta el tiempo de fraguado (retardación/aceleración).

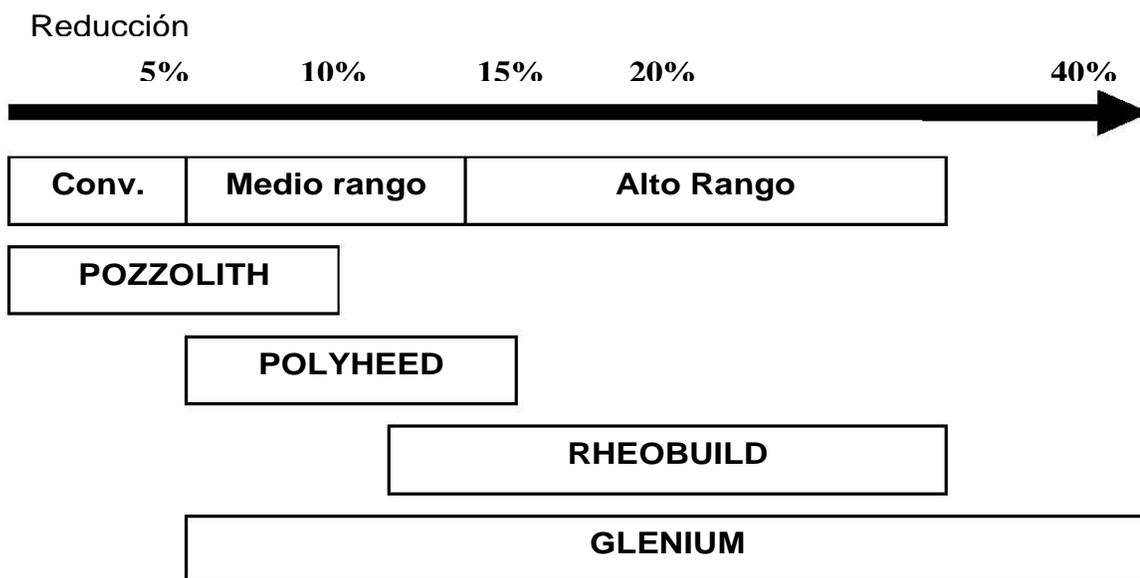
##### Propiedades del Concreto Endurecido:

- Incrementa la Resistencia
- Mejor Durabilidad
- Mejor Control de Calidad en Producción



<sup>4</sup> ACI 116.R-2

## Reductores de Agua



### Reductores de Agua Convencionales:

- Reducen el agua hasta 5%
- Principalmente para concretos de < 12.5cm (5 in) de revenimiento
- Utilizado en concretos con relaciones de a/c moderadas o altas
- Se puede utilizar en combinación con reductores de alto rango para bajar a/c (economizar).

### Desventajas de los Reductores Convencionales

- Cuando se Utilizan en dosificación alta:
  - Sangrado excesivo
  - Retardo del fraguado
  - Bajas resistencias iniciales

### Tipos de Reductores de Agua Convencionales

**Pozzolith 322N**, Fig. 1.4 (lignosulfonato balanceado)  
 Dosificación media baja de 195-460 ml/100 kg  
 (3-7 oz fl/100 lb) de cemento.



Fig. I.4 Pozzolith 322N

## I.2 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO

La trabajabilidad del concreto en estado fresco debe ser juzgada con base en la medida del revenimiento. La muestra y la prueba se realizarán de acuerdo con la norma **ASTM-C-143** "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete" (Método de Ensayo Estándar para el Revenimiento en el Concreto a base de Cemento- Hidráulico) Fig. I.5.



Fig. I.5 Obtención del revenimiento según la norma ASTM-C-143

Se pueden tener varias medidas de revenimiento en el concreto, dependiendo de la resistencia y trabajabilidad que se pretenda alcanzar. Un revenimiento ideal está dentro del orden de 10 a 15 cm (4 a 6 in). La prueba de revenimiento debe efectuarse dentro de los 2 ½ minutos de obtenida la muestra. El método de obtención del revenimiento es el que se describe a continuación:

- Inicia con el llenado del cono de Abrams (Fig. I.6) en tres capas iguales.
- A cada capa se le debe introducir la barra estándar 25 veces de manera distribuida.
- Una vez llenado el molde, este debe ser enrasado retirando el concreto sobrante.
- Deberá retirarse verticalmente el molde en un lapso de 3 a 7 segundos.
- El revenimiento será la medida de desplazamiento que presente el concreto desde su estado inicial hasta un estado final.

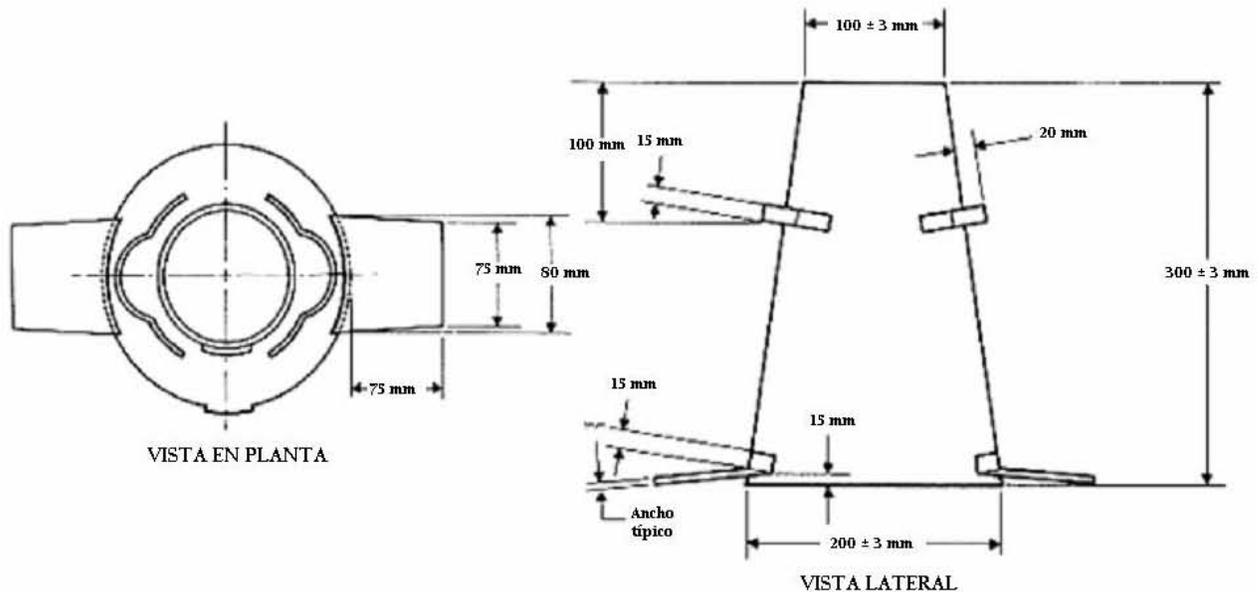


Fig. I.6 Cono para la prueba de revenimiento (cono de Abrams)

## I.2.1 MASA VOLUMÉTRICA

Cuando se requiera conocer la masa volumétrica del concreto, ésta debe ser medida de acuerdo con la norma **ASTM-C-138** “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete” (Método de Ensaye Estándar para la Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto).

El volumen del concreto representado por la muestra debe ser considerado como satisfactorio si el cálculo arrojado, realizado con el valor del peso unitario obtenido, brinda un valor con una aproximación de  $\pm 2\%$ .

## I.2.2 TEMPERATURA

Se puede especificar, como medida opcional, la temperatura dentro de ciertos límites para condiciones especiales, y debe ser medida a través de una muestra representativa obtenida de acuerdo con la norma **ASTM-C-1064** “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete” (Método de Ensaye Estándar para la Temperatura del Concreto de Cemento Pórtland Recién Mezclado).

Se considerará adecuado el volumen de concreto representado por la muestra si tiene una temperatura de  $\pm 2$  °C del valor especificado.

### I.2.3 AIRE INCLUIDO

La determinación del contenido de aire incluido, de una muestra representativa, será tomada en el punto de descarga de la revolvedora, se hará de acuerdo con la norma **ASTM-C-231** "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method" (Método de Ensaye Estándar para el Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método de Presión). Fig. I.7. La muestra se aceptará con una tolerancia de  $\pm 2\%$  del valor requerido. La prueba medirá la cantidad de aire dentro de una mezcla de concreto, debiéndose iniciar dentro de los cinco minutos posteriores al mezclado.



Fig. I.7 Determinación del contenido de aire según la norma ASTM-C-231

Los pasos a seguir para determinar esta propiedad son los que se enumeran a continuación:

1. El recipiente de prueba debe llenarse a mano a razón de 3 capas iguales.
2. A cada capa el concreto debe compactarse de manera uniforme con 25 penetraciones de la barra, la cual debe penetrar cerca de una pulgada en la capa anterior.
3. La olla se debe golpear con un martillo de goma para eliminar los vacíos de aire.
4. Después de que en la capa superior se muestre una consolidación del concreto, esta se debe nivelar con ayuda de una barra enrasadora apretando para evitar vacíos.
5. Se monta la tapa del aparato, inyectando agua en el compartimiento correspondiente, se bombea el aire hasta que la aguja este en la línea de presión inicial.
6. Finalmente el aire es descargado con ayuda de una válvula de lanzamiento. La lectura restante da como resultado el porcentaje de contenido de aire.

### I.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO

El concreto es un material de múltiples fases, que contiene pasta de cemento (partículas hidratadas), agua, agregados aditivos. En términos generales, las propiedades mecánicas y físicas de un sistema compuesto dependen de las propiedades de sus componentes y de la interacción mecánica, física y química entre ellos.

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

#### I.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a la compresión del concreto será juzgada tomando como base el uso de probetas en forma de cilindros de 15 x 30 cm.

El procedimiento para evaluar el cumplimiento de las mezclas incluye:

- Normas o Reglamento de Construcción aplicados **ASTM-C-39/C-39M** “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*” (*Método de Ensayo Estándar para Fuerzas a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*).
- Muestreo y prueba de acuerdo con **NMX-C-161** “*Muestreo de concreto fresco*”, **NMX C-83** “*Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto*”.
- Tres especímenes de prueba que compondrán una muestra representativa, uno por bachada de concreto.
- Edad de prueba del concreto: 7, 14, 28 y 90 días.
- Tipo de muestreo y volumen, representado por las pruebas.
- Normas para evaluar el cumplimiento de las pruebas.

La resistencia a compresión es la medida de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Se estima que un concreto a 7 días tendrá 75% de la resistencia a 90 días, a 28 días el 85% y entre 28 y 90 días se incrementará el 15% restante. Para los concretos con Alto Consumo de Ceniza Volante (HVFA), se espera que la resistencia a los 90 días se equipare con la resistencia a los 28 días de los concretos testigo.

---

### I.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

El módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E_c$ ) de cualquier material es una medida de la rigidez del material<sup>5</sup>. El procedimiento recomendado para obtener  $E_c$ , lo establece la **ASTM-C-469** “*Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*” (*Método de Ensayo estándar para el Módulo de Elasticidad Estático y de Relación de Poisson del Concreto a Compresión*).

El módulo de elasticidad del concreto es función de la resistencia específica del concreto a la compresión, se define como la pendiente de la secante trazada desde una deformación de  $50 \times 10^{-6}$  hasta un esfuerzo de compresión de  $0.40 f'c$ , El módulo de elasticidad del concreto es sensible al módulo de elasticidad del agregado y difiere del módulo de éste.

Debido a que el módulo de elasticidad del agregado es raramente conocido, algunas expresiones para el módulo de elasticidad del concreto permiten que el del agregado se sustituya por un coeficiente que está en función de la densidad del concreto. Algunas investigaciones han concluido que también el tamaño máximo del agregado incide en el módulo de elasticidad del concreto, incrementándose éste con los tamaños grandes de los materiales pétreos.

En los concretos en general existe una tendencia a variar el módulo de elasticidad con el incremento en la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. Para concretos clase 2 (resistencia menor a  $250 \text{ kg/cm}^2$ ) se suponen módulos de elasticidad igual a  $2500 \sqrt{f'c}$ , en MPa ( $8000 \sqrt{f'c}$ , en  $\text{kg/cm}^2$ ), según las Normas Técnicas Complementarias para el RCDF.

Ahora bien, cuando al concreto se le comprime en una dirección, al igual que ocurre con otros materiales, éste se expande en la dirección transversal a la del esfuerzo aplicado. La relación entre la deformación transversal y la longitudinal se conoce como relación de Poisson ( $\mu$ ) *Fig. 1.8*.

La deformación debida a la tracción se considera positiva y a la deformación causada por la compresión se considera negativa. La definición de la relación de Poisson incluye un signo negativo; para el concreto oscila comúnmente entre 0.15 y 0.20.

---

<sup>5</sup> ASTM C469

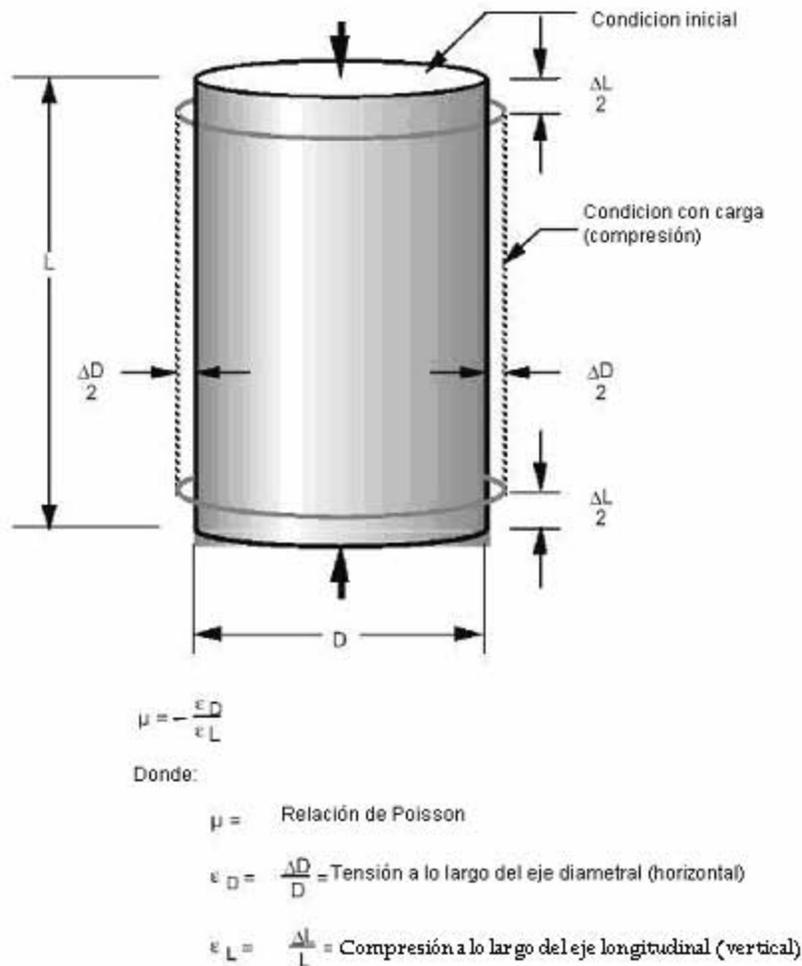


Fig. I.8 Relación de Poisson

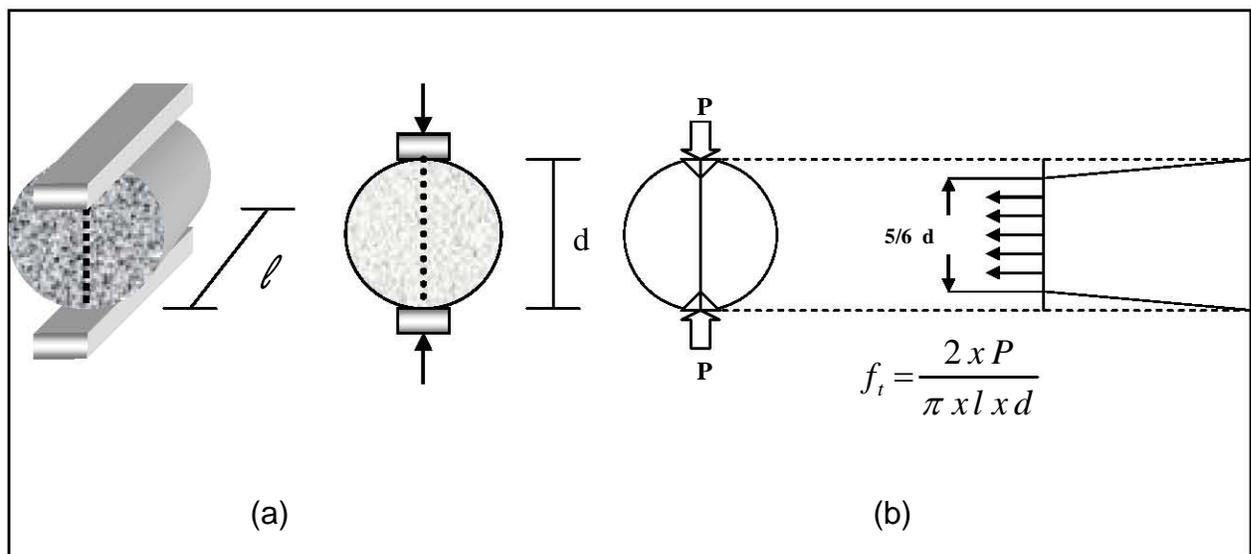
### I.3.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA

Uno de los procedimientos para determinar la resistencia a tensión es la llamada prueba indirecta, o de tensión por compresión diametral, también conocida como Brasileña, que consiste en ensayar un espécimen cilíndrico en posición horizontal, sometiéndolo a la acción de dos fuerzas opuestas de compresión uniformemente distribuidas a lo largo de las generatrices contenidas en su plano vertical de simetría; de manera que, al quedar sometido el cilindro a esta condición de carga a compresión diametral, se produce en dicho plano la distribución de esfuerzos como se muestra en la Fig. 1.9 (b). Ahí se hace notar que en la vecindad del sitio de aplicación de carga se generan esfuerzos de compresión de gran magnitud; pero en el resto de la sección del cilindro, en una amplitud de aproximadamente el 80% de su diámetro, se producen esfuerzos de tensión prácticamente uniformes.

A fin de reducir la concentración de esfuerzos de compresión a lo largo de las generatrices donde se aplican las cargas, se interponen dos tiras de material compresible (generalmente de madera) entre la superficie del espécimen y las placas, o piezas metálicas que transmiten las cargas. De esta forma se evita la ruptura de la muestra por aplastamiento en la zona de contacto, y se consigue que el espécimen falle por efecto de los esfuerzos de tensión, según una superficie de falla normal a estos, que corresponde sensiblemente al plano vertical en que actúan las cargas, *Fig. 1.9 (a)*.

La prueba Brasileña se desarrolló a mediados del siglo pasado en la década de los 50's para evaluar la resistencia a la tensión del concreto. El ensaye es sobre probetas cilíndricas (de altura longitudinal  $l$  y diámetro  $d$ ), cargadas por medio de dos placas rígidas paralelas, a lo largo de dos generatrices opuestas. Cuando se ensaya una probeta frágil, la falla se presenta a lo largo del plano vertical diametral, conectando las dos placas de carga.

Si la probeta presenta una alta resistencia a la compresión, entonces la falla se producirá por exceder los esfuerzos inducidos a la resistencia a tensión del concreto en la parte media del diámetro vertical cargado. Ensayo a realizarse de acuerdo con la norma **ASTM-C-496** "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens" (*Método de Ensaye Estándar para Determinar la Resistencia a Tensión Indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto*).



**Fig. 1.9** Prueba de Tensión Indirecta, también conocida como Prueba Brasileña

### **I.3.4 CAMBIOS VOLUMÉTRICOS (CONTRACCIÓN POR SECADO)**

Una característica indeseable del concreto hidráulico es su predisposición a manifestar cambios volumétricos, particularmente contracciones, que suelen causar agrietamientos en las estructuras. Aunque existen varios tipos de contracción entre las que destacan la contracción plástica y la contracción autógena:

- *La contracción plástica ocurre a medida que el concreto fresco pierde humedad después de la colocación y antes de que ocurra cualquier desarrollo de resistencia.*
- *La contracción autógena resulta de las reacciones químicas que ocurren a medida que el cemento Pórtland se hidrata. Esta contracción tiene lugar sin la pérdida real de agua del concreto.*

La contracción por secado es lo que la mayoría considera "la verdadera contracción". Este tipo de contracción involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cementante y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel. A medida que el concreto en servicio se seca, se pierde humedad desde estos poros muy pequeños y se forman meniscos. La tensión superficial del agua asociada a estos meniscos atrae los poros uno hacia el otro y da como resultado una pérdida de volumen del concreto.

Una porción del total de la deformación que se observa en un elemento de concreto es atribuida a la contracción por secado. La deformación por contracción es dependiente del tiempo y no es inducida por carga.

Puesto que la contracción por secado está relacionada con la pérdida de humedad del concreto, es influida por factores externos que afectan el secado y también por factores internos.

- Los factores externos que efectúan la pérdida de humedad del concreto son las condiciones ambientales, así como el tamaño y la forma del elemento de concreto.
- Los factores internos que afectan la contracción por secado del concreto son aquellos relacionados con sus constituyentes: cementos, agregados, aditivos; diseño de mezcla del concreto; relación agua cemento y contenido de agua; propiedades de los agregados y fracción de volumen; y aquellos vinculados con la construcción del concreto: colocación, compactación y curado.

Algunas de las medidas que pueden tomarse para reducir la contracción por secado del concreto incluyen:

- Uso de un mínimo contenido de agua (consistente con los requisitos de colocación y acabado).
- Empleo de la fracción de volumen más alta posible de agregado de buena calidad, y tamaño máximo posible del agregado.
- Uso de cemento de contracción compensada cuando pueda disponerse de éste.
- No utilizando aditivos que se sepa que incrementen la contracción por secado; por ejemplo, aquéllos que contienen cloruro de calcio.
- Asegurándose de que el concreto sea apropiadamente colocado, compactado y curado.

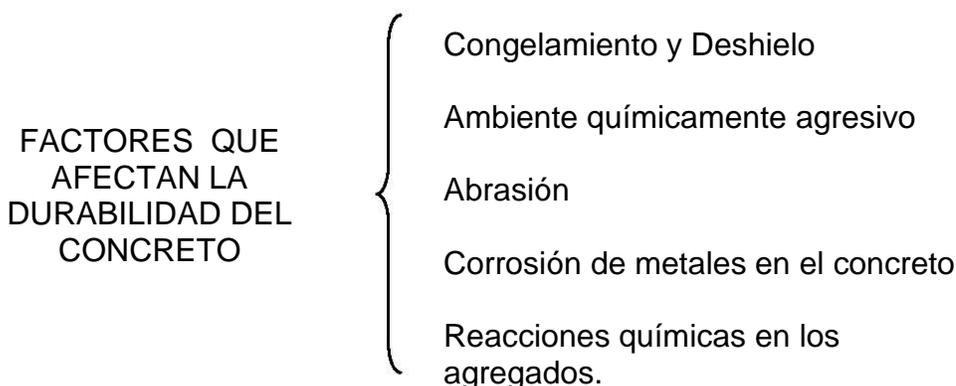
El ensayo se realiza con base en la norma **ASTM-C-157** “*Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*” (*Método de Ensayo Estándar para Determinar el Cambio de Longitud del Mortero y del Concreto Endurecidos de Cemento Hidráulico*). Este método de prueba cubre la determinación del cambio de longitud en especímenes de mortero y concreto endurecidos de cemento hidráulico hechos en el laboratorio y expuestos a las condiciones controladas de temperatura y humedad.

### **I.3.5 DURABILIDAD**

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento Pórtland, como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro al concreto.

La conclusión primordial que se desprende de la definición anterior, es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos.

El problema de la durabilidad es sumamente complejo, en la medida en que cada situación de exposición y condición de servicio ameritan una especificación particular tanto para los materiales y diseño de mezcla, como para los aditivos, la técnica de producción y el proceso constructivo, por lo que es usual que en este campo las generalizaciones resulten nefastas. Por tal motivo, no se debe copiar o “adaptar” especificaciones técnicas locales y foráneas para proyectos y situaciones que muestren similitudes aparentes, pero que, sin embargo, desde el punto de vista de la tecnología del concreto y la durabilidad, se requiere una evaluación y criterios particulares, ya que existen diversos factores que afectan la durabilidad del concreto.



El sistema estructural usado para la vivienda es, un sistema altamente hiperestático lo que le da gran resistencia y rigidez, por lo que a diferencia de otros tipos de sistemas estructurales la probabilidad de falla o colapso es muy baja. Los esfuerzos mecánicos que se presentan en los diversos elementos son relativamente bajos, dado que los espacios que cubren y rodean las viviendas son reducidos. Esto da por resultado que los espesores de los elementos planos (como losas o muros) sean reducidos, y que las secciones transversales de los elementos lineales (como castillos, cadenas o cerramientos) presenten también pequeñas dimensiones. Como consecuencia de esto, el acero de refuerzo tiene siempre un recubrimiento escaso, lo cual facilita que los agentes agresivos del ambiente iniciadores de la corrosión tengan un camino muy corto que recorrer para alcanzar el acero de refuerzo.

La calidad especificada en el concreto (verificada por medio de la resistencia a compresión) suele ser menor de las que se usan para la construcción de estructuras. Esto tiene como consecuencia un material altamente permeable que permite una alta tasa de penetración y avance de los agentes no deseables.

En adición a lo anterior se presenta el ahorro de costos en los materiales utilizados que atenta contra la durabilidad de las estructuras y en casos de viviendas de interés social, donde por condiciones socioeconómicas los usuarios no hacen mantenimiento, obligan a profundizar el diseño arquitectónico y estructural a fin de asegurar una durabilidad mínima aceptable.

Los problemas detectados en viviendas de interés social, alertan sobre la necesidad de considerar la durabilidad como otro factor importante en el diseño y construcción de viviendas. Las Normas Técnicas Complementarias (N.T.C.) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (R.C.D.F.) incluyen la durabilidad como una acción más a considerar en el diseño del concreto estructural.

En dichas normas se desglosa que, “la durabilidad será tomada en cuenta en el diseño, mediante la determinación de la clasificación de exposición, donde la clasificación de exposición para el miembro será la que corresponda a la superficie que tenga la condición de exposición más desfavorable”.

Tradicionalmente se asoció la durabilidad a las características resistentes del concreto y particularmente a su resistencia en compresión, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que no es el único ni suficiente para obtener un concreto durable, siendo solo uno de los aspectos involucrados.

Varias de las investigaciones de laboratorio y de campo que involucran a los cementos y a las cenizas volantes de diversas fuentes en Canadá y los EU, han demostrado la durabilidad excelente del concreto con HVFA. Los datos típicos de la durabilidad se resumen en la *tabla I.10*.

**TABLA I.10 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DURABILIDAD TÍPICAS DE ESTUDIOS EN EL CONCRETO CON GRANDES CANTIDADES DE CENIZA VOLANTE**

Prueba	Duración de curado húmedo	Condiciones de exposición	Resultados
Permeabilidad al agua bajo presión uniaxial de 2.7 MPa	≈ 120 días	> 100 días bajo presión de 2.7 MPa	$\leq 10^{-13}$ m/s
Congelamiento y deshielo, ASTM-C-666, procedimiento A	14 días	1000 ciclos	Factores de durabilidad $\geq 90$
Resistencia a la penetración del ion cloruro ASTM-C-1202	28 días 91 días 365 días	6 hrs. a 60 volts	500 a 2000 coulombs 200 a 700 coulombs ≈ 150 coulombs
Corrosión (a) Corrosión (b)	7 días seguido por 28 días de curado en seco	Losas de concreto bajo solución de 3.4% de NaCl por 6 meses  Losas de concreto bajo solución de 4% de NaCl por 10 años	Ninguna indicación de la corrosión de las barras de acero con cubierta de 13 mm  Ninguna indicación de la corrosión de las barras de acero con cubierta de 13 mm
Resistencia a los sulfatos	28 días	Sumergido en solución de 5% de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> por 10 años	Expansión insignificante de los prismas de la prueba después de 10 años
Reacción Alcali-sílice	24 hrs. en moldes	Diversas condiciones de prueba aceleradas	Expansión insignificante de los prismas de la prueba
Carbonatación, Fenolftaleína prueba en corazones extraídos de bloques de 1.6 x 1.6 x 1.6 m a temperatura de 25°C con 50% de H. R.	28 días	31 meses 4 años 7.5 años 13 años 15 años	4 mm 7mm 8mm 11 mm 12 mm
Exposición marina	> 91 días	10 años de ciclo húmedo y seco. 100 ciclos por año de congelamiento y deshielo, ataque de agua de mar	Ningún deterioro significativo
Resistencia a la abrasión del concreto ASTM-C-799	91 días	Tiempo para alcanzar 2 mm de abrasión, segundos	Similar al concreto de control
Límite de resistencia a la fatiga	28 días	4 millones de ciclos de fatiga	Similar al concreto de control

FUENTE: V M Malhotra; P K (Povindar K) Mehta, High-performance, high-volume fly ash concrete

Las investigaciones a realizar en cuanto a la durabilidad de los concretos con HVFA y sus respectivos concretos testigo estarán enfocadas a las pruebas de resistencia a la penetración del ion cloruro norma ASTM-C-1202, y a la resistencia a los sulfatos, normas ASTM-C-1012 y NMX- C-418, descritas a continuación.

### I.3.5.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO

La resistencia a la penetración del ion cloruro es uno de los parámetros críticos que se debe tener en cuenta en el estudio de la durabilidad de una estructura de concreto armado.

Ciertos tipos de concreto son más vulnerables al ataque porque los iones del cloruro encuentran más fácil penetrarlos y llegar al acero de refuerzo. El resultado es corrosión rápida en el acero de refuerzo que puede tomar la forma de corrosión de picaduras o de corrosión general. La corrosión de picaduras puede reducir rápidamente el tamaño de la sección o de hecho separar totalmente el acero que refuerza a los miembros, estropeando o agrietando la integridad de la estructura. La corrosión general dará lugar a que el concreto se agriete o rompa. Esto dañará en última instancia la integridad estructural.

Esta prueba es de gran utilidad cuando se evalúan nuevos materiales, distintas dosificaciones, el desempeño del concreto en obra, así como también para aceptar o rechazar nuevas especificaciones técnicas. Debido a que los ensayos de penetración de ion cloruro requieren tiempos de exposición prolongados, se ha buscado desarrollar métodos acelerados basados en la aplicación de un campo eléctrico.

La norma **ASTM-C-1202** “*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*” (*Método de Ensayo Estándar para la Indicación Eléctrica de la Capacidad del Concreto para Resistir la Penetración del Ion Cloruro*) cubre la determinación de la conductancia eléctrica del concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de los iones del cloruro (*Fig. I.10*).

El ensayo consiste en registrar la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de probetas de concreto<sup>6</sup> con altura de 50 mm (2 in) y de 100 mm (4 in) de diámetro durante un período de 6 horas. Una diferencia potencial de 60 Volts se mantiene a través de los extremos del espécimen, uno de los cuales se sumerge en una solución de cloruro de sodio (NaCl) conectada a una terminal positiva, y el otro en una solución de hidróxido del sodio (NaOH) conectada a una terminal negativa. La carga eléctrica (coulombs) que atraviesa la probeta permite clasificar al concreto de acuerdo con el siguiente cuadro:

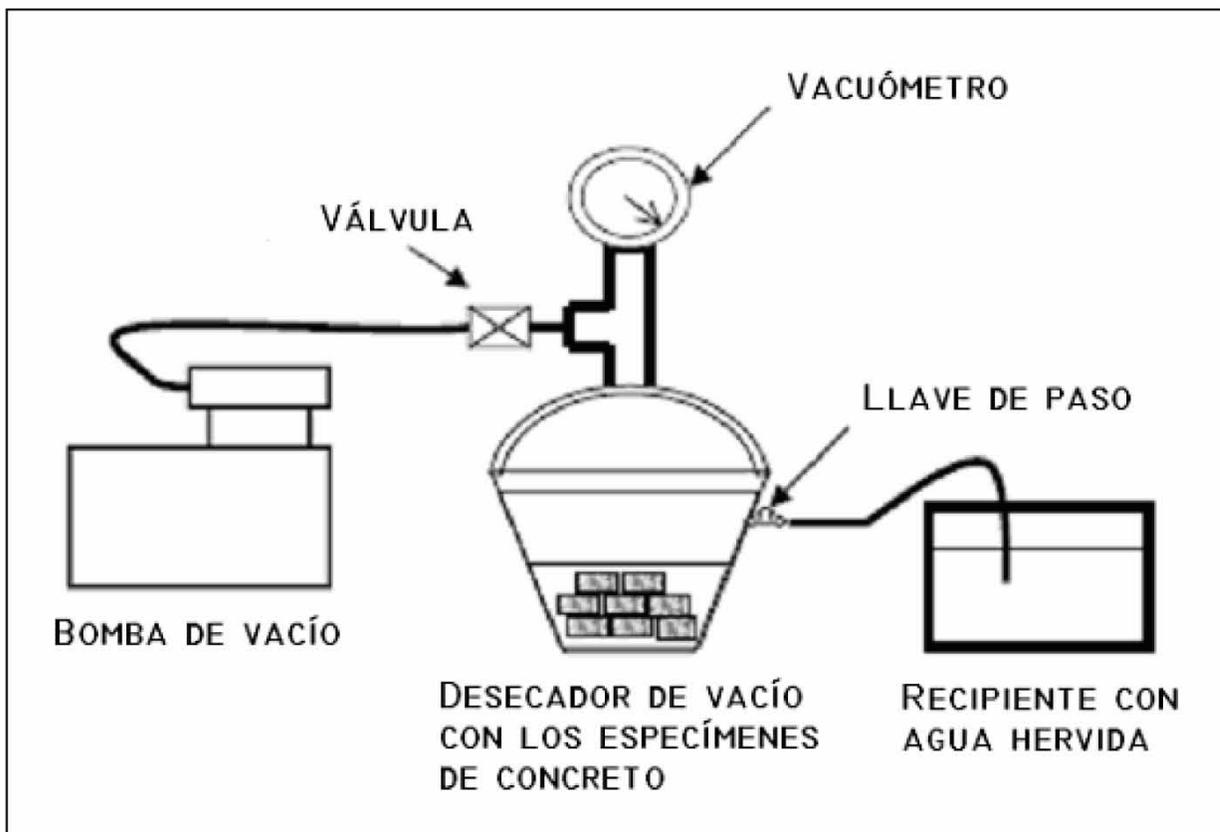
---

<sup>6</sup> Probetas preparadas conforme a lo estipulado en la norma ASTM-C-1202 y cuyo proceso de habilitación puede verse ilustrado en la Fig. I.11

Carga	Penetrabilidad Ion Cloruro
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy baja
< 100	Despreciable



**Fig. I.10** Prueba resistencia a la penetración del ion cloruro con un equipo marca Proove'it cumpliendo con lo estipulado en la norma ASTM-C-1202



**Fig. I.11** Preparación de las probetas para efectuar la prueba de resistencia a la penetración del ion cloruro, fuente: manual Proove'it

### **I.3.5.2 RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS**

Los sulfatos que afectan la durabilidad, se hallan usualmente en el suelo en contacto con el concreto, en solución en agua de lluvia, en aguas contaminadas por desechos industriales o por flujos en suelos agresivos. Por lo general consisten en sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio.

Los suelos con sulfatos se hallan normalmente en zonas áridas, y pese a que pueden no estar en muy alta concentración, si se producen ciclos de humedecimiento y secado sobre el concreto, la concentración puede incrementarse y causar deterioro.

El mecanismo de acción de los sulfatos considera dos tipos de reacción química:

- Combinación del sulfato con hidróxido de calcio libre (cal hidratada) liberado durante la hidratación del cemento, formándose Sulfato de Calcio (yeso) de propiedades expansivas.
- Combinación de yeso con Aluminio Cálcico Hidratado para formar sulfoaluminato de calcio hidratado (etringita) también con características de aumento de volumen. Algunos investigadores indican que existe un efecto puramente físico causado por la cristalización de las sales sulfatadas en los poros del concreto con aumento de volumen y deterioro.

Estas reacciones químicas en el concreto pueden causar expansión en ciertas condiciones. Ya que pueden llegar a formar productos expansivos como es esencialmente la etringita en la matriz de concreto, cuando las expansiones son excesivas y no controladas, tiene lugar el fisuramiento y eventualmente la destrucción de la estructura.

Esta expansión volumétrica puede generarse por la presencia excesiva de sulfato de calcio en el cemento o de cantidades excesivas de sulfatos disueltos provenientes de fuentes externas, como son el suelo o el agua, que sean capaces de penetrar en la estructura de concreto endurecido.

Una forma de mejorar la resistencia al ataque de los sulfatos es considerar el uso de puzolanas en el concreto (entre estas la ceniza volante). Un estudio de tipo comparativo en cuanto a la resistencia del concreto a los sulfatos hecha con un cemento tipo V según la ASTM, con cementos que incorporaban escoria y con concretos con HVFA fue iniciada en el CANMET “Canada Centre for Mineral and Energy Technology” (Centro Canadiense para Tecnologías Mineral y Energética) en 1991. Los especímenes de concreto fueron sumergidos en una solución de 5% de Sulfato de Sodio ( $\text{NaSO}_4$ ). La concentración de la solución fue mantenida por varios años, supervisando los cambios de la longitud en las barras.

Las barras de concreto con HVFA se visualizaron mejor que las barras de concreto con cemento tipo V y que las barras de concreto de cemento-escoria. La razón primaria del excelente funcionamiento del concreto con HVFA parece ser su muy baja permeabilidad.

La prueba de resistencia a los sulfatos a realizarse en esta investigación se efectuará en barras de concreto; serán 3 barras prismáticas de sección cuadrada de 75 mm (3 in) por lado y longitud efectiva (distancia entre las caras internas de los índices metálicos, medida con la barra espaciadora) de 250 mm (10 in), para cada una de las mezclas. El curado es de 90 días (28 días de curado húmedo y el resto de curado en seco). Posteriormente, se sumergen en una solución al 5 por ciento de sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ) y se realiza un estudio visual, además de que se toman lecturas para verificar los cambios de longitud.

Esta prueba se realiza de manera similar a lo indicado en las **normas NMX-C-418-ONNCCE** “Cambio de longitud de morteros con cemento hidráulico expuesto a una solución de sulfato de sodio” y la **ASTM-C-1012** “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution” (Método de Ensaye Estándar para el Cambio de Longitud de Morteros de Cemento Hidráulico Expuestos a una Solución de Sulfato”. La diferencia radica que en vez de realizar la prueba a morteros, esta se implementa a concretos.

## CAPÍTULO II

### CONCRETOS CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE

En su forma básica, el concreto es una mezcla de cemento Pórtland, arena, grava y agua siendo el cemento Pórtland el principal cementante en el concreto. Hoy en día, la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material.

Una de estas adiciones empleadas que sustituye parcialmente al cemento es la ceniza volante (Fly-Ash), cuyo uso en la fabricación de concreto se dio a inicios de los años ochenta del siglo pasado.

Los concretos con altos contenidos de ceniza volante (HVFA = High Volume Fly Ash), son un tipo específico de los concreto fabricados con cenizas volantes. La diferencia principal entre los concretos HVFA y el concreto con ceniza volante usual, está dada por la cantidad de cemento Pórtland utilizado; en los concretos con HVFA la cantidad de cemento se reduce al mínimo a través del diseño apropiado de la mezcla. No existe un porcentaje fijo de reemplazo de cemento Pórtland por ceniza volante en este tipo de concreto pero, en muchos casos, los porcentajes utilizados están en el orden del 50% al 55%. El término HVFA fue acuñado por V. Mohan Malhotra en el CANMET.

#### II.1 CENIZA VOLANTE

La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alumina, hierro, y calcio. Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio, y el carbono. También se encuentra presente una pequeña cantidad de compuestos cristalinos. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.1 a 3.0 y su color es gris o beige.

##### II.1.1 ORIGEN

Las cenizas volantes son un subproducto emanado en grandes cantidades durante las operaciones cotidianas de centrales carboeléctricas. El carbón como fuente de energía es pulverizado y soplado en un compartimiento ardiente donde enciende para calentar los tubos de la caldera. Las partículas más pesadas de la ceniza (ceniza de fondo o escoria) caen al fondo del compartimiento ardiente, mientras que las partículas más ligeras (cenizas volantes) siguen suspendidas en los humos.

Para retener las cenizas volantes del flujo de gases que sale de la cámara de combustión y evitar que sean emitidas a la atmósfera se emplean diversos sistemas de retención: filtros de tejidos especiales, colectores mecánicos, depuradores por vía húmeda y precipitadores electrostáticos. Las cenizas volantes se recogen de las tolvas de los precipitadores, desde donde son transportadas a lugares de almacenamiento (*Fig. II.1*).

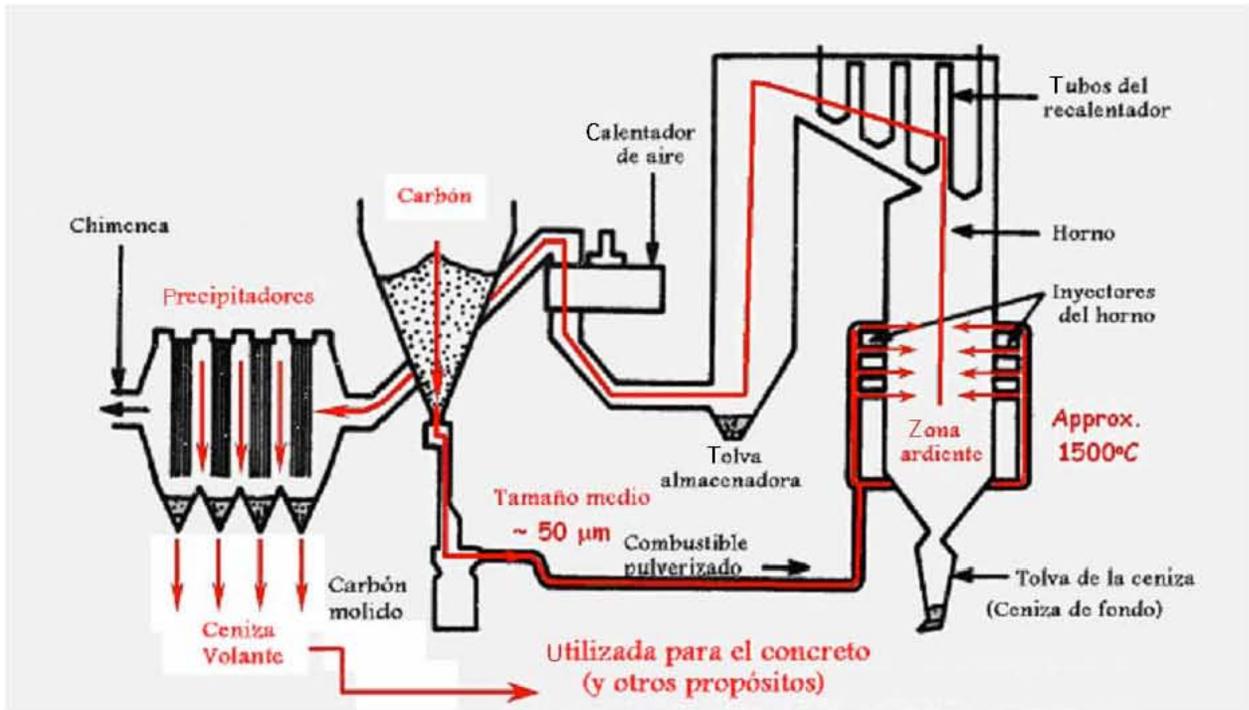


Fig. II.1 Planta de generación térmica - Esquema de la caldera

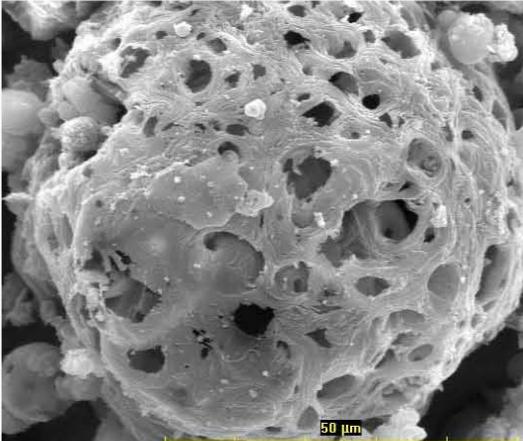
## II.1.2 TIPOS DE CENIZA VOLANTE

Según la norma ASTM-C-618 existen tres clases de aditivos minerales que son:

- **Clase N.** Puzolanas crudas o calcinadas como las tierras diatomáceas, horstenos opalinos, arcillas, lutitas, tobas y cenizas volcánicas.

- **Clase F.** Cenizas volantes producidas por la combustión de carbón de antracita o bituminoso, son típicamente puzolánicas. Los materiales con las características puzolánicas contienen silicatos vítreos y alúmina que, en presencia de agua y de cal libre, reaccionan con el calcio en la cal produciendo silicatos e hidratos de calcio (componentes cementantes).
- **Clase C.** Cenizas volantes normalmente producidas por la combustión de lignito o de carbón sub-bituminoso, el cual puede contener CaO en más de 10 por ciento. Además de tener características puzolánicas, también tienen algunas características propias de los cementantes (capacidad de endurecer y de ganar resistencia en presencia solamente de agua).

### II.1.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS



**Fig. II.2** Estructura típica de la partícula de ceniza volante

Las cenizas volantes son finas, partículas polvorizadas predominantemente esféricas, sólidas o huecas, en su mayor parte amorfas (vítreas) en naturaleza (*Fig. II.2*). El material carbonoso en las cenizas volantes se compone de partículas angulares. La distribución del tamaño de la partícula de la mayoría de las cenizas volantes de carbón bituminoso es generalmente similar a la de un limo (menos que 0.075 milímetros o tamiz No. 200). Aunque las cenizas volantes de carbón sub-bituminoso son también del tamaño de un limo, estas son generalmente un poco más gruesas que las cenizas volantes del carbón bituminoso.

La densidad relativa de las cenizas volantes se encuentra generalmente dentro del rango de 2.1 a 3.0, mientras que su área superficial específica, medida por el método de la permeabilidad al aire de Blaine, puede estar dentro del rango de 170 a 1000 m<sup>2</sup>/kg.

El color de las cenizas volantes puede variar de tonalidad, dependiendo de la cantidad de carbono sin quemar en la ceniza. La disminución en la intensidad del color, se debe al bajo contenido de carbono. Las cenizas volantes de lignito o de carbón sub-bituminoso son generalmente de un color más tenue, indicando cantidades relativamente bajas de carbono así como la presencia de un poco de cal o calcio. Las cenizas volantes bituminosas son generalmente de una tonalidad gris oscuro, cuanto más ligero sea el tono gris generalmente indica una mejor calidad de la ceniza.

## II.1.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Las características químicas de las cenizas volantes son influenciadas en gran parte por las del carbón quemado. Hay básicamente cuatro tipos, o clases, de carbón, que varía en términos de su valor calorífico, su composición química, contenido de ceniza, y origen geológico. Los cuatro tipos, o clases, de carbón son: carbón de antracita, carbón bituminoso, carbón sub-bituminoso, y carbón de lignito.

- **Antracita:** carbón duro con un contenido muy alto de carbono y muy bajo en humedad.
- **Bituminoso:** carbón blando con un contenido más alto de carbono y más bajo en humedad que el carbón sub-bituminoso
- **Sub-bituminoso:** carbón blando con un contenido medio de carbono
- **Lignito:** carbón blando de color parduzco o negro con un bajo contenido de carbono

Los componentes principales de las cenizas volantes (Clase F) de carbón bituminoso son sílica, alúmina, óxido del hierro, y calcio, con cantidades variantes de carbono, según lo medido en la *pérdida por calcinación* (**LOI** = Loss On Ignition). Las cenizas volantes (Clase C) de lignito y de carbón sub-bituminoso se caracterizan por concentraciones más altas de óxido de calcio y de magnesio y porcentajes reducidos de óxido de silicio y de hierro, también por un contenido más bajo de carbono, comparado con las cenizas volantes de carbón bituminoso. Muy poco carbón de antracita se quema en calderas para uso general, así que solo hay pequeñas cantidades de cenizas volantes de carbón de antracita.

La *Tabla II.1* compara los rangos normales de los componentes químicos de las cenizas volantes de carbón bituminoso con las de las cenizas volantes de carbón del lignito y de las cenizas volantes de carbón sub-bituminoso. De la tabla, es evidente que las cenizas volantes de carbón de lignito y de carbón sub-bituminoso tienen un contenido más alto del óxido de calcio y pérdidas más bajas por calcinación (LOI) que las cenizas volantes de los carbones bituminosos. Las cenizas volantes de carbón de lignito y de carbón sub-bituminoso pueden tener una concentración más alta de los compuestos de sulfato que las cenizas volantes de carbón bituminoso.

**Tabla II.1 Intervalos normales de la composición química para las cenizas volantes producto de diversos tipos del carbón (expresados como porcentaje del peso).**

Componente	Bituminoso	Sub-Bituminoso	Lignito
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	20-60	40-60	15-45
Alúmina u óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5-35	20-30	10-25
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10-40	4-10	4-15
Óxido de calcio (CaO)	1-12	5-30	15-40
Óxido de magnesio (MgO)	0-5	1-6	3-10
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0-4	0-2	0-10
Óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0-4	0-2	0-6
Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	0-3	0-4	0-4
Pérdida por calcinación (LOI) <sup>1</sup>	0-15	0-3	0-5

(1) La Pérdida Por Calcinación (LOI), es una medida de la cantidad de carbono que no se quema en las cenizas volantes, es una de las características químicas más significativas de las cenizas volantes, especialmente como indicador de la conveniencia para el uso como reemplazo del cemento en concreto.

La diferencia principal entre las cenizas volantes de la clase F y de la clase C está en la cantidad de calcio y en el contenido de sílice, alúmina, y hierro en la ceniza. En cenizas volantes de la clase F, el calcio total se encuentra en rangos del 1 a 12 por ciento, sobre todo bajo la forma de hidróxido de calcio, sulfato de calcio, y componentes vidriosos conjuntamente con la sílice y la alúmina. En cambio, las cenizas volantes de la clase C pueden reportar contenidos altos de óxido de calcio de hasta 30 a 40 por ciento.

Otra diferencia entre la clase F y la clase C es que la cantidad de álcalis (sodio y potasio combinados) y los sulfatos (SO<sub>4</sub>) son generalmente más altos en las cenizas volantes de la clase C que en las cenizas volantes de la clase F.

## II.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONCRETOS CON CENIZA VOLANTE COMO SUSTITUTO PARCIAL DE CEMENTO PÓRTLAND

Las cenizas volantes, han tenido una buena aceptación como material puzolánico que puede ser utilizado ya sea como componente de los cementos Pórtland mezclados o como adición mineral en el concreto. En la práctica comercial, la dosificación de las cenizas volantes es limitada entre el 15% y 20% de la masa total de cemento. Generalmente, esta cantidad tiene un efecto provechoso en la economía, en la trabajabilidad y en el costo del concreto pero puede no ser suficiente para mejorar la durabilidad al ataque de los sulfatos, a la expansión de la reacción álcali-sílice, y al agrietamiento térmico. Para este propósito, se están utilizando cantidades más grandes de cenizas volantes, en el orden del 25 al 35 %.

Aunque el orden del 25 al 35 % de ceniza volante por la masa de cemento es considerablemente más alto que el de 15 al 20 %, éstas aún no se clasifican como mezclas de concreto con HVFA. De consideraciones teóricas y de experiencia práctica, se ha determinado que, con el 50% o más de reemplazo del cemento por las cenizas volantes, es posible una producción sustentable, de concretos de alto desempeño, que demuestran alta trabajabilidad, alta resistencia última, y alta durabilidad.

### II.2.1 CONCRETO TÍPICO

A causa de un alto volumen de finos y a un bajo contenido de agua, el concreto fresco con HVFA generalmente es muy cohesivo y muestra poco o casi nada de sangrado y de segregación. Demuestra bombeabilidad y trabajabilidad excelentes en revenimientos de sólo 75 milímetros, no obstante valores más altos de revenimiento pueden ser especificados para estructuras con elevada cantidad de acero de refuerzo. El material se asienta bien sin dejar espacios sin mucho esfuerzo y se comporta casi como un Concreto Autocompactable<sup>1</sup>. Por lo tanto, el acabado superficial es generalmente liso y satisfactorio.

Debido a un más bajo contenido de cemento de Pórtland, los concretos con HVFA pueden tardar una a dos horas más de tiempo en endurecer. Aditivos acelerantes no deben ser utilizados a menos que su compatibilidad con la mezcla de concreto haya sido probada adecuadamente. En tales casos, el uso de un cemento de Pórtland de rápido-endurecimiento ofrece una mejor solución.

---

<sup>1</sup> El concreto autocompactable es una mezcla que puede compactarse en todos los rincones de una cimbra únicamente por medio de su propio peso sin necesidad de compactación por vibrado y que a pesar de su alta fluidez el agregado grueso no tiene segregación

Los concretos con HVFA para un período corto, generalmente no sufren una pérdida excesiva en el revenimiento. En lugares de trabajo donde se implemente el retempering<sup>2</sup>, el concreto preparado con HVFA permite recuperar la pérdida de revenimiento severa con una cantidad pequeña de superplastificante o de agua, para que la relación agua/cementante no exceda el límite especificado.

La baja relación agua/cementante, sin sangrado en el concreto los hace vulnerables a la contracción tanto plástica como autógena. En losas en nivel, la superficie de concreto se debe proteger contra cualquier pérdida de agua con un ambiente húmedo alrededor de la estructura durante la colocación, o cubriendo la superficie con un hule pesado inmediatamente después de que la colocación haya terminado. Un mínimo de 7 días de curado húmedo es obligatorio para alcanzar la resistencia óptima y características de durabilidad que son posibles con el uso del concreto con HVFA.

## II.2.2 PARTICULARIDADES DEL CONCRETO

De acuerdo con la experiencia de campo y las pruebas de laboratorio, las particularidades del concreto con HVFA, cuando es comparado al concreto convencional del cemento de Pórtland, se puede resumir de la siguiente manera:

- Fluidez, bombeabilidad, y compactabilidad más fáciles.
- Mejor y más rápido acabado en la superficie final, cuando el acabado detallado no es requerido.
- Resistencias-tempranas de hasta 7 días, que se pueden acelerar con los cambios convenientes en el diseño de la mezcla, cuando se retire la cimbra o la carga estructural inicial sea alcanzada.
- Mayor aumento en la resistencia última entre los 28 y 90 días o más. (En Mezclas de concreto con HVFA, el incremento de la resistencia entre el día 7 y 90 excede a menudo de 100%, por lo tanto es innecesario el sobre-diseño con respecto a una resistencia especificada dada.).
- Estabilidad dimensional y resistencia superiores contra el agrietamiento por contracción térmica, contracción autógena, y contracción por secado. En el concreto desprotegido, una tendencia más alta para agrietarse por contracción plástica.

---

<sup>2</sup> La práctica de retempering se realiza con frecuencia en ambientes calidos-secos para aumentar el revenimiento más allá de los límites de la especificación típica (de  $100 \pm 25$  mm.) para cubrir con la necesidad por apresurar los funcionamientos de vaciado y reducir el esfuerzo de consolidación.

- Después de tres o seis meses de curado, resistencia a la conductividad eléctrica y resistencia a la penetración del ion cloruro mucho más altas, según la norma C-1202 de la ASTM.
- Durabilidad muy alta al ataque por corrosión, expansión álcali-sílice, y ataque de los sulfatos.
- Menor costo económico debido a un costo de material cementante más bajo.
- Mejor trato ambiental debido a la disposición ecológica de grandes cantidades de cenizas volantes, reduciendo las emisiones de bióxido de carbono, y el incremento en la productividad de la industria de la construcción con concreto.

### **II.3 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE**

Por una variedad de razones, la industria de construcción con concreto no es totalmente sustentable. Primero, consume grandes cantidades de materiales vírgenes, tales como arena, grava, roca triturada, y agua dulce. En segundo lugar, el cementante principal en el concreto es el cemento Pórtland; la producción de este contribuye de manera significativa al efecto-invernadero; las emisiones de gas están involucradas en el calentamiento global y en el cambio del clima, la industria del cemento Pórtland es un generador de bióxido de carbono, también necesita de grandes cantidades de energía. Tercero, mucho concreto estructural sufre la carencia de durabilidad que tiene un efecto nocivo en la productividad de la industria.

Puesto que el sistema de concreto con grandes cantidades de las cenizas volantes trata los tres problemas de sustentabilidad y durabilidad, su adopción permitirá a la industria de la construcción con concreto llegar a ser más rentable.

#### **II.3.1 VENTAJAS EN EL CONCRETO**

Los productores de concreto pueden utilizar las cenizas volantes para mejorar la calidad y la durabilidad de sus productos. Las cenizas volantes mejoran la trabajabilidad, bombeabilidad, cohesividad, y al final, la resistencia última y la durabilidad del concreto, así como solucionan muchos problemas experimentados por el concreto al día de hoy; todo a menor costo. Sin embargo, las cenizas volantes, se deben utilizar con cuidado. Ya que sin el conocimiento adecuado de su uso y sin tomar las precauciones apropiadas, pueden desarrollarse problemas, en cuanto al tiempo de fraguado, al desarrollo de la resistencia, y la durabilidad.

Las ventajas de usar las cenizas volantes desde luego que compensan las desventajas. La ventaja más importante es la baja permeabilidad al agua y a los productos químicos agresivos. El concreto correctamente curado hecho con las cenizas volantes crea un producto más denso porque el tamaño de los poros se reduce. Esto incrementa la resistencia y disminuye la permeabilidad.

### **II.3.1.1 EN ESTADO FRESCO**

Puesto que las partículas de las cenizas volantes son esféricas y dentro de la misma escala de tamaño que el cemento Pórtland, se puede obtener una reducción en la cantidad de agua necesitada para mezclar y colocar concreto. En el concreto prefabricado, esto puede ser llevado a una mejor trabajabilidad, dando como resultado esquinas y bordes agudos con un mejor aspecto superficial. Las cenizas volantes también benefician al concreto prefabricado reduciendo la permeabilidad, que es la causa principal de una falla temprana. El uso de las cenizas volantes puede dar lugar a una mejor trabajabilidad, bombeabilidad y cohesividad, mejorando la resistencia última y la durabilidad. Las partículas finas en cenizas volantes ayudan a reducir el sangrado y la segregación mejorando la bombeabilidad y los acabados, especialmente en mezclas pobres.

### **II.3.1.2 EN ESTADO ENDURECIDO**

La resistencia en el concreto depende de muchos factores, el más importante de ellos es el cociente de la relación agua/cemento. Las cenizas volantes de buena calidad generalmente mejoran la trabajabilidad o por lo menos producen la misma trabajabilidad con menos agua. La reducción en agua conduce a una mayor resistencia. Debido a que algunas de las cenizas volantes contienen partículas más grandes o menos reactivas que el cemento de Pórtland, la hidratación significativa puede continuar por seis meses o más, conduciendo a una resistencia última mucho más alta que la del concreto sin ceniza volante.

Han habido varios casos en los que la resistencia temprana del concreto es relativamente baja, particularmente donde una porción significativa (30 por ciento o más) del cemento de Pórtland fue sustituido por las cenizas volantes. Esta necesidad hoy en día no es un problema serio, puesto que el tiempo fijado también es controlado por muchos otros factores que se pueden alterar para compensar a las cenizas volantes agregadas, en caso de ser necesario.

La proporción apropiada de ceniza volante en el concreto puede representar un costo más bajo en su fabricación. A causa de la reducción en la permeabilidad y a la reducción de óxido de calcio en cenizas volantes propiamente seleccionadas, estas deben ser menos susceptibles a la reacción del álcali-agregado. Los ataques de sulfatos y otros químicos se reducen cuando se agregan las cenizas volantes.

Las cenizas volantes, tienen poco efecto en la prueba de deformación diferida (creep), se sospecha de su contribución a la corrosión porque reaccionan con el hidróxido de calcio. De hecho, las cenizas volantes, no reducen sustancialmente la alcalinidad, mas bien la baja permeabilidad ayuda a proteger al concreto contra la penetración del cloruro, causante de la corrosión. Se puede utilizar un superplastificante combinado con las cenizas volantes para hacer el concreto de alto rendimiento y de alta resistencia. Los concretos con cenizas volantes generalmente trabajan mejor en el plano de las pruebas de contracción por secado.

### **II.3.2 VENTAJAS ECONÓMICAS Y AMBIENTALES**

La población y sus necesidades económicas crecen de forma progresiva, pero no sucede lo mismo con los recursos naturales en que ésta se basa, y por consiguiente se ha llegado a una era en que la prosperidad global depende mayormente de un uso más eficiente de los recursos, de su distribución más equitativa y de la reducción de los niveles de consumo en general. Lo anterior aunado al cambio del clima que se ha identificado como uno de los desafíos más grandes a los que harán frente las naciones y los gobiernos.

El cambio del clima tiene implicaciones en los sistemas: naturales, humanos y económicos y podía conducir a cambios significativos en el uso y la producción de recursos, y en la actividad económica.

Es ahí, donde fabricar materiales de construcción a partir de cenizas volantes parece ser una gran idea que entrevé ventajas económicas y ambientales, dos ventajas que en este caso están muy ligadas entre sí.

El impacto económico del uso de cenizas volantes es positivo dado al costo potencialmente más bajo del concreto con cenizas volantes comparado con el concreto convencional. La ceniza volante se puede utilizar para crear productos superiores debido a sus características inherentes como cementante.

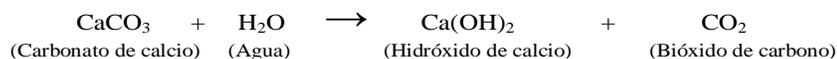
Las cenizas volantes que se agregan a las mezclas de cemento Pórtland pueden producir viviendas económicas fuertes y más duraderas que las hechas solamente de concreto con cemento Pórtland, alargando la vida de servicio y reduciendo los costos de mantenimiento. Además de esto, la puesta en práctica de una tecnología que implica el uso de grandes cantidades de cenizas volantes, un subproducto industrial, en el concreto no requiere de ninguna inversión importante, tendrá impactos benéficos y significativos en el ambiente.

Usar las cenizas volantes de carbón conserva energía reduciendo la demanda de los materiales típicos tales como cal, cemento y piedra triturada, que requieren de energía para obtener un producto final.

Como se sabe, el cemento Pórtland es un componente esencial para el concreto. Sin embargo, en décadas recientes, la producción de cemento ha sido señalada como un importante agente contaminador generando los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) por todo el mundo. Solamente la producción del cemento de Pórtland se asocia al 6-8% de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generado por el hombre, los GEI (Fig. II.3) contribuyen de manera importante al calentamiento global.

El CO<sub>2</sub> esta asociado con la fabricación del cemento Pórtland en 3 categorías:

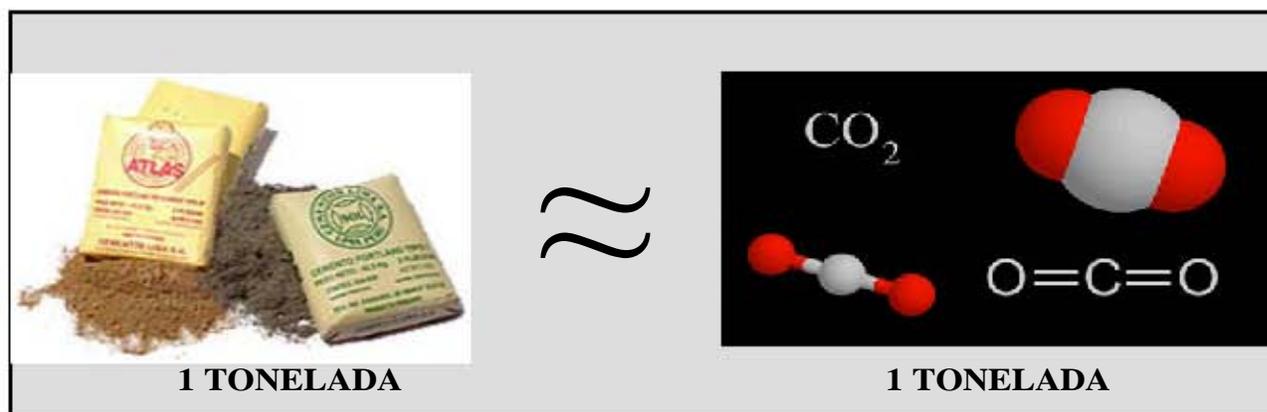
1. El CO<sub>2</sub> derivado de la decarbonatación<sup>3</sup> de la piedra caliza.



2. CO<sub>2</sub> de la combustión del combustible del horno, y
3. El CO<sub>2</sub> producido por los vehículos en plantas y en la distribución del cemento.

Además del CO<sub>2</sub> asociado al consumo de energía eléctrica, puesto que éste varía según el tipo y eficiencia locales de generación. El consumo de energía eléctrica típica está dentro del orden de 40-45 KWH por tonelada de cemento.

Como resultado de estas medidas, la regla general es que la creación de una tonelada de cemento emite una tonelada de bióxido de carbono a la atmósfera.



<sup>3</sup> Reacción inversa a la carbonatación



**Fig. II.3** Efecto invernadero, fuente: UNEP/GRIS “United Nations Environmental Programme/Global Resource Information Database” (Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente / Base de Datos sobre Recursos Mundiales)

La creciente preocupación que se tiene por los GEI en la calidad del aire ha inspirado una revisión de las prácticas de la industria que ha culminado en el reconocimiento de reciclar los productos de la combustión del carbón como medio para reducir la huella ambiental que ha dejado la industria y alcanzar mayor sustentabilidad a través de:

- La recuperación del valor de la energía y los recursos naturales expendidos para producir electricidad.
- El uso reducido de terraplenes (para almacenar la ceniza de los hornos industriales).
- El rédito creciente de la venta de productos secundarios (como materiales funcionales que realzan a la industria de la construcción).

El reciclaje de las cenizas volantes permite a las industrias del concreto mantener o aumentar su productividad así como reducir sus demandas de energía y de recursos naturales mientras que obtiene reducciones en la emisión del CO<sub>2</sub>:

- Emisiones reducidas de los GEI atribuibles a la fabricación del cemento y del concreto.
- Consumo de energía reducida (en el cemento o en la fabricación del concreto).
- Consumo reducido de los recursos naturales.

El acuerdo internacional bajo el “Protocolo de Kyoto” (PK), que fue ratificado por la comunidad internacional, hace obligatorio que los 37 países desarrollados reduzcan sus emisiones de GEI incluyendo el CO<sub>2</sub>. Solo estos 37 países expidieron el 61.6 por ciento de emisiones globales de bióxido de carbono en 1990, teniendo que reducirlas a un promedio de 5.2%, en relación con los niveles de emisiones de 1990, durante el periodo comprendido entre 2008 y 2012.

Además de las reducciones de emisiones en sus propios países, el PK incluye ciertos “mecanismos flexibles” con el fin de ayudar a los países a cumplir sus compromisos mediante costos reducidos. Uno de estos mecanismos es el “Mecanismo de Desarrollo Limpio” (MDL). El MDL también proporciona la oportunidad para que los países en vías de desarrollo puedan participar en el proceso de reducción de emisiones de GEI.

A través del MDL, un país desarrollado, que tiene compromisos cuantificados de reducción o limitación de sus emisiones de GEI, puede desarrollar proyectos que contribuyan a reducir las emisiones en países en desarrollo que no tienen objetivos en la reducción de estas emisiones. Por la realización de estos proyectos, el país recibe una cantidad de reducciones certificadas igual a la cantidad de gases reducida por los mismos, pudiendo utilizar estos certificados a efectos de contabilizar el cumplimiento de sus objetivos.

No hay un valor “oficial estable” sobre el precio de una tonelada de Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) reducida o no emitida, aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (hasta el 2005, el Banco Mundial empleaba un precio de \$5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente no emitida). México que en el 2006 comercializó 35.9 millones de toneladas de cemento según la Cámara Nacional del Cemento (Canacem), usando la regla de que la creación de una tonelada de cemento emite una tonelada bióxido de carbono, equivaldría a 35.9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Así por ejemplo, si pudiéramos reemplazar por lo menos el 20 por ciento de la utilización de cemento por ceniza volante, el país habría salvado cerca de 20 por ciento de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta sustitución del 20% por ceniza volante salvaría en emisiones de CO<sub>2</sub> a 7.18 millones de toneladas. Esto nos traslada a un valor comercial de \$ 35.9 millones de dólares.

De esta manera, no solo se ayuda a preservar el medio ambiente sino que además se obtiene una utilidad económica.

## CAPÍTULO III

### PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO

El objetivo del diseño de una mezcla de concreto es determinar la combinación más práctica y económica de los materiales disponibles, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de su uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada, deberá poseer las siguientes características:

- En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
- En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y apariencia uniforme.
- Economía.

Trabajabilidad aceptable. Facilidad de colocar, consolidar y acabar el concreto recién mezclado. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar excesivamente y se debe evitar el sangrado. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos – cementantes, arena y grava dentro de la masa.

Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme. La durabilidad del concreto según el ACI es: “la capacidad para resistir las acciones del medio, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca el deterioro del concreto. El concreto es durable cuando retiene las condiciones originales de forma, calidad y aptitud de servicio, luego de su exposición al medio ambiente”. También se ha dicho que “durabilidad significa conservar los niveles requeridos de servicio, es decir, mantener la calidad en el tiempo de vida útil”.

Economía. Esto se refleja si un material esta disponible en dos o mas fuentes y existe una diferencia significativa en el precio, la fuente menos costosa de abastecimiento es la seleccionada. Es importante en razón del agregado, ya que ocupa del 66% al 75% del volumen del concreto, y del cemento, por ser el material de mayor costo.

En lo posible, la dosificación del concreto debe basarse en datos obtenidos de pruebas o en la experiencia adquirida con los materiales que serán empleados. Cuando estos antecedentes sean limitados o no estén disponibles, pueden emplearse manuales que presenten la práctica de la dosificación.

### III.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el laboratorio se trabajó con seis proporcionamientos de mezclas de concreto para consumos de cemento y ceniza volante indicados en la tabla siguiente:

Mezcla*		Cemento Pórtland (Kg./m <sup>3</sup> )	Ceniza Volante (Kg./m <sup>3</sup> )	
M1 200 GA	1	M1C200GA	200	0
	2	M1HVFA200GA	100	100
M2 250 GA	3	M2C250GA	250	0
	4	M2HVFA250GA	125	125
M3 300 GA	5	M3C300GA	300	0
	6	M3HVFA300GA	150	150

\* Las mezclas 1, 3 y 5 son consideradas mezclas testigo

Es de mencionar que se realizaron 3 diseños, partiendo del proporcionamiento de las mezclas testigo. El proporcionamiento de las mezclas testigo se realizó de acuerdo con los diseños para concretos característicos de los utilizados en la construcción de viviendas, elaborados con agregados andesíticos y consumos de cementantes de 200, 250 y 300 kg/m<sup>3</sup>. Enseguida para estos mismos proporcionamientos se sustituyó el 50% de cemento por cenizas volantes, donde la única variación que se hizo fue en la cantidad de aditivo utilizado. Sirviendo los primeros diseños como pauta a seguir para los concretos con HVFA. De esta manera cada diseño de concreto con HVFA tendrá su comparativo idéntico de concreto convencional.

#### III.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA

El concreto de diseño deberá tener las siguientes características:

- En estado fresco: trabajabilidad aceptable; revenimiento de 10 a 15 cm.
- En el concreto endurecido: Resistencia, durabilidad y apariencia adecuadas; se determinaron consumos de 200, 250 y 300 kilogramos de cementante por metro cúbico de concreto.
- Homogeneidad adecuada, sin segregación.
- Economía, debido a que su implementación esta propuesta para la vivienda de interés social.

La constitución de las mezclas de concreto con HVFA, al igual que las denominadas mezclas testigo, debe cumplir satisfactoriamente con los criterios de desempeño para este material en estado fresco y endurecido denotados dentro del capítulo I.

Aun más, las mezclas de concreto con HVFA deberán mostrar una mejor trabajabilidad en estado fresco, y una mayor durabilidad relacionada con la reducción en la permeabilidad en estado endurecido; además, una disminución en costos dada la procedencia del material cementante y la importancia económica que este presenta, tal y como se vio en el capítulo II.

## III.2 DISEÑO DEL PROPORCIONAMIENTO

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó un procedimiento modificado a partir del método **ACI 211** “*Standard Practice for Seleting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete*” (*Practica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de Densidad Elevada y Masivo*).

Los diseños de las mezclas testigo no partieron de la idea de conseguir las resistencias características para la vivienda de interés social, resistencia asociada a la relación agua/cementante, a pesar de ser una característica importante. Mas bien partieron de la cantidad de cementante por metro cúbico de concreto, es decir, 200, 250 y 300 kg/m<sup>3</sup> tomando en cuenta otras propiedades como la durabilidad y la permeabilidad. A continuación se enuncia el proceso de diseño:

- Se definieron los volúmenes absolutos en porcentaje para agregados finos y gruesos (50%-50%) considerados congruentes e idénticos para cada consumo de cemento.
- Con el TMA y el revenimiento propuesto para las mezclas (fijado entre 10 y 20 mm, para antes de agregar el aditivo reductor de agua), de acuerdo con el ACI se seleccionó la cantidad de agua por metro cúbico de mezcla.
- Se adicionó a las mezclas un aditivo reductor de agua (Pozzolith 30N) con el que se obtiene un incremento en el revenimiento de entre 10 y 15 centímetros.
- El contenido de agua obtenido se ajusta restando y sumando los porcentajes de humedad y absorción de los agregados pétreos, ya que el agregado empleado en la fabricación de las mezclas no tiene un estado Saturado y Superficialmente Seco (SSS).

Los diseños originales, es decir sin el ajuste por humedad y absorción de los agregados, se muestran en la *Tabla III.1*.

**TABLA III.1 PROPORCIONAMIENTOS DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO**

Materiales	Cantidades empleadas, kg/m <sup>3</sup>					
	Mezclas (100% Cemento)			Mezclas (50% Cemento + 50% Ceniza)		
	M1 C200GA	M2 C250GA	M3 C300GA	M1 HVFA200GA	M2 HVFA250GA	M3 HVFA300GA
Agua*	165	160	180	165	160	180
Cemento	200	250	300	100	125	150
Ceniza	0	0	0	100	125	150
Agregado grueso	846	834	794	825	810	762
Agregado fino	838	827	787	818	802	755
Aditivo (Pozzolih 322 N)	0.93	1.10	1.00	0.50	1.10	1.40
Masa volumétrica, kg/m <sup>3</sup>	2050	2072	2062	2009	2023	1998
Relación A/C	0.83	0.64	0.60	0.83**	0.64**	0.60**
Relación grava/arena	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50

\* Agua de mezclado. Hay que agregarle el agua de absorción y quitarle el agua de humedad de los agregados

\*\* Relación A/C = Relación A/(C+ceniza)

Cabe mencionar que para conseguir cada uno de estos diseños, se realizaron varias pruebas preliminares donde se varió la cantidad de agua y aditivo.

### III.2.1 FABRICACIÓN DEL CONCRETO



Para fabricar las mezclas se utilizó una revolvedora eléctrica con olla giratoria con capacidad de 90 litros (*Fig. III.1*), dada la capacidad cada una de las mezclas se repartió en tres bachadas iguales. Aprovechando esta limitación se obtendrán muestras y especímenes clasificados por bachada, promediados en cada prueba para hacer a esta más representativa.

**Fig. III.1** Revolvedora utilizada

Al igual que el diseño del proporcionamiento, el proceso de mezclado también difiere del establecido por la norma **ASTM-C-192** “*Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*” (*Practica Estándar para la Fabricación y Curado de Especímenes Prueba de Concreto en el Laboratorio*), y su procedimiento se describe en los párrafos siguientes.

1. El día anterior a la fecha de fabricación de las mezclas se pesó: la arena, la grava y el cementante<sup>1</sup>, cubriéndose todos con plástico para que no cambiaran su humedad. Se colocó una muestra característica de los agregados gruesos y finos dentro del horno para realizar el ajuste por humedad.
2. El día de fabricación se efectuó el ajuste por humedad dando los siguientes proporcionamientos<sup>2</sup> mostrados en la *Tabla III.2*, corrigiendo entonces las cantidades de arena y grava que se tenían del día anterior, enseguida se pesó el agua de mezclado y se humedeció la olla revolvedora para que esta no absorbiera agua durante el mezclado.

**TABLA III.2 PROPORCIONAMIENTOS EMPLEADOS EN LAS MEZCLAS DE CONCRETOS**

Materiales	Cantidades empleadas, kg/m <sup>3</sup>					
	Mezclas (100% Cemento)			Mezclas (50% Cemento + 50% Ceniza)		
	M1 C200GA	M2 C250GA	M3 C300GA	M1 HVFA200GA	M2 HVFA250GA	M3 HVFA300GA
Agua	227	201	217	235	219	228
Cemento	200	250	300	100	125	150
Ceniza	0	0	0	100	125	150
Agregado grueso	856	855	816	837	826	778
Agregado fino	863	860	818	830	819	778
Aditivo (Pozzoloth 322 N)	0.93	1.10	1.00	0.50	1.10	1.40
Masa volumétrica, kg/m <sup>3</sup>	2147	2167	2152	2103	2115	2085

<sup>1</sup> Cemento Pórtland en mezclas testigo y cemento Pórtland + ceniza volante en mezclas con HVFA

<sup>2</sup> Proporcionamientos proyectados para 1 m<sup>3</sup> de concreto, proporcionamientos originales pueden verse en el **APÉNDICE 2**

3. Se colocó la arena y la grava dentro de la revolvedora agregándose un poco del agua de mezclado sirviendo esta como agua de absorción para los agregados mezclando por espacio de un minuto.
4. Pasado el minuto se detuvo la revolvedora para que se agregara el cementante, una vez depositado todo dentro de la revolvedora, ésta se activaba mientras le era suministrada el resto del agua de mezclado.



**Fig. III.2** Colocación de componentes de la mezcla

5. Acabando con el vaciado del agua se contaban tres minutos de mezclado para enseguida parar y cubrir con un trapo húmedo la revolvedora por espacio de cinco minutos, esto con la finalidad de permitir el fraguado falso, pasados estos cinco minutos se volvía a activar la revolvedora, para romper el fraguado falso<sup>3</sup> en caso de que este se hubiese presentado. A minuto y medio de activada la revolvedora se agregaba el aditivo (*Fig. III.3*) que ya había sido previamente medido, dejando que este reaccionara con la mezcla por espacio de otro minuto y medio, pasado este lapso la revolvedora era detenida y la mezcla estaba lista.



**Fig. III.3** Colocación del aditivo a la mezcla

6. Se obtenía el revenimiento, peso volumétrico fresco y contenido de aire, para enseguida proseguir con el llenado de moldes en dos capas y la compactación del concreto la cual se realizaba con ayuda de una mesa vibratoria. A partir del paso tres el procedimiento se repetía para cada una de las tres bachadas, es decir para cada mezcla de concreto se obtuvieron 3 revenimientos, 3 pesos volumétricos y 3 contenidos de aire.
7. Los especímenes se dejaban por espacio de 24 horas dentro de los moldes antes de ser descimbrados y llevados a la cámara de curado (*Fig. III.4*) a temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa del 100%, previa rotulación y clasificación<sup>4</sup> de los especímenes.

<sup>3</sup> Endurecimiento inicial de la pasta o del concreto que se presenta entre uno y cinco minutos después del mezclado. Si hay evidencia de fraguado errático, demanda de mayor cantidad de agua, se incrementa el agrietamiento, bajas resistencias o contenido errático de aire incluido.

<sup>4</sup> Clasificación por prueba y por bachada



**Fig. III.4** Probetas dentro de la cámara de curado

### III.2.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO FABRICADO EN ESTADO FRESCO

Las propiedades que nos permitirán evaluar el nivel de calidad del concreto serán la homogeneidad (mantenimiento de características similares dentro de una misma bachada) y la uniformidad (mantenimiento de características similares entre distintas bachadas). Los parámetros a emplearse para comprobar la homogeneidad y uniformidad del concreto serán:

- la masa volumétrica,
- el contenido de aire,
- el índice de consistencia (revenimiento) y
- la resistencia a compresión.

La homogeneidad se analiza evaluando la dispersión que existe entre características de diversas muestras tomadas de la misma bachada, lo que permite comprobar la idoneidad del proceso de dosificación y mezclado. La uniformidad se analiza evaluando, mediante el coeficiente de variación, la dispersión que existe entre características análogas de distintas bachadas. Para ello, normalmente, se utilizan los valores de la resistencia a compresión a 7 y/o 28 días.

Para que una mezcla sea homogénea se requiere que cumpla con las características según lo estipula la *Tabla III.3*.

**Tabla III.3 REQUISITOS DE HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO**

Determinación	Ensaye ASTM	Diferencia máxima NMX-C-155 (ASTM- C-143)
Masa volumétrica, kg/m <sup>3</sup>	C-138	16
Contenido de aire, %	C-231, C-173	1
Consistencia (revenimiento), cm Si el promedio es menor de 5 cm Si el promedio es entre 6 y 10 cm Si el promedio es entre 10 y 15 cm Si el promedio es mayor de 15 cm	C-143	±1.5 ±2.5 ±3.5 ±3.5
Resistencia promedio a compresión a 7 días, basada en el promedio de las resistencias de todas las muestras comparativas ensayadas, %	C-31, C-39	7.5

### III.2.2.1 MASA VOLUMÉTRICA

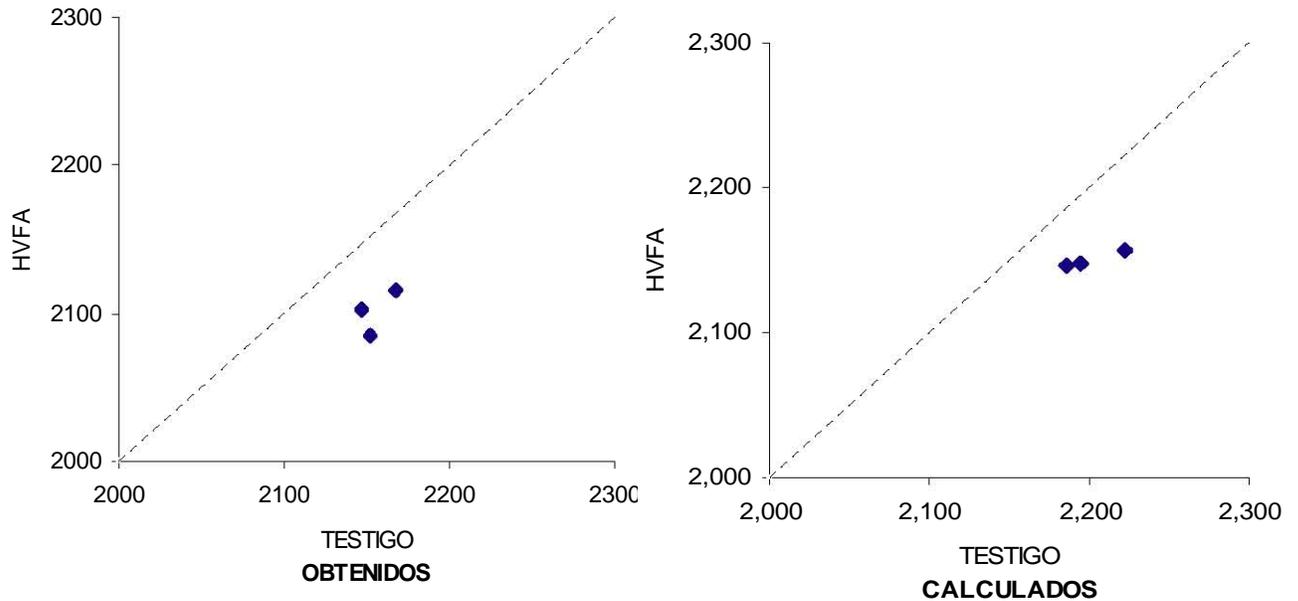
La masa volumétrica, es la cantidad de materia por m<sup>3</sup> (unidad de volumen), es decir la suma de los materiales componentes del concreto, ajustando las cantidades requeridas en el proporcionamiento se obtuvo la cantidad de material por m<sup>3</sup> de concreto, y por consiguiente la masa volumétrica calculada de cada una de las mezclas como se observó en la *Tabla III.2*. Bajo la norma ASTM-C-138, se determinó la masa volumétrica del concreto fresco de todas las mezclas elaboradas y de cada una de sus bachadas de esta (3 por mezcla), elaborándose un promedio por mezcla.

En la *Tabla III.4* se muestra un comparativo entre ambas masas volumétricas (la calculada y la obtenida), observando una variación aceptable entre ambos valores.

**Tabla III.4 COMPARATIVO ENTRE MASAS VOLUMÉTRICAS**

Mezcla	Masa volumétrica del Concreto Fresco (kg/m <sup>3</sup> ).	
	Calculada	Obtenida
M1C200GA	2,147	2,186
M1HVFA200GA	2,103	2,146
M2C250GA	2,167	2,223
M2HVFA250GA	2,115	2,156
M3C300GA	2,152	2,195
M3HVFA300GA	2,085	2,148

En la *Fig. III.5* se muestra la masa volumétrica de las mezclas de concreto testigo vs el concreto con HVFA, tanto en valores calculados como en los obtenidos. En esta figura se puede observar que las mezclas testigo cuentan con una mayor masa volumétrica que las mezclas con HVFA.



**Fig. III.5** Masas Volumétricas, TESTIGO VS HVFA

En general tanto los concretos testigo como los concretos con HVFA deben ser catalogados dentro de los concretos normales clase 2, esto según las NTC del RCDF, donde se establecen masas volumétricas dentro del rango de 1.9 – 2.2 ton/m<sup>3</sup>.

### III.2.2.2 CONTENIDO DE AIRE

El método implementado para obtener el contenido de aire del concreto fresco, se basó en la medición del cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión. El equipo utilizado para este ensayo está dentro de la norma ASTM-C-231, cuenta con una carátula que registra directamente el contenido de aire, en %, con respecto al volumen de concreto, tal y como se muestra en la *Fig. III.6*.

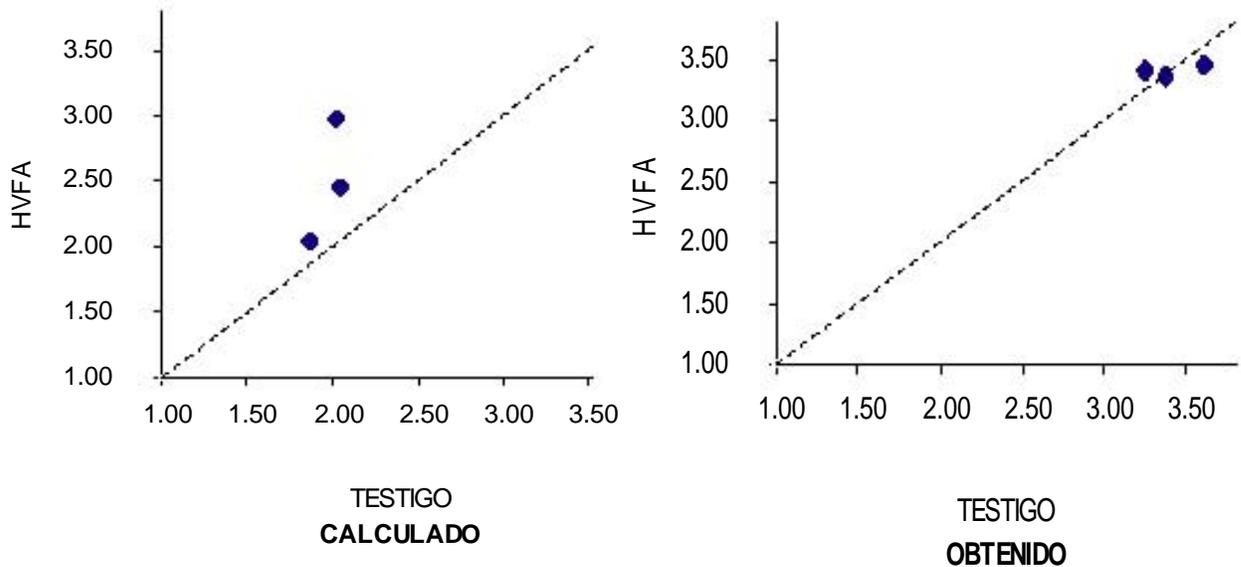


**Fig. III.6** Obtención del contenido de aire en el laboratorio, según la norma ASTM-C-231

De igual forma que para la masa volumétrica, el contenido de aire también se calcula con los datos obtenidos durante el mezclado, así se tendrán dos valores por mezcla para esta propiedad. Cuyos valores al igual que los obtenidos con la norma ASTM-C-231 se muestran en la *Tabla III.5* y en la *Fig. III.7*.

**Tabla III.5** CONTENIDO DE AIRE (%)

Mezcla	CONTENIDO DE AIRE (%)	
	Calculado	Obtenido
M1C200GA	1.87	3.60
M1HVFA200GA	2.05	3.45
M2C250GA	2.05	3.25
M2HVFA250GA	2.46	3.40
M3C300GA	2.02	3.37
M3HVFA300GA	2.98	3.35



**Fig. III.7** Contenido de aire en el concreto fresco, TESTIGO VS HVFA

Con ayuda de la tabla y la figura pasadas, se observa que el contenido de aire fue mayor que el usual del 2.0%, en el obtenido aun mucho mayor que en el calculado; en este segundo puede verse un claro incremento en el contenido de aire por parte de los concretos con HVFA, mientras que en el obtenido se observa una similitud entre ambos tipos de concreto.

### III.2.2.3 CONSISTENCIA (REVENIMIENTO)

Como ya se ha mencionado, la prueba del revenimiento sirve para juzgar la consistencia y trabajabilidad de una mezcla, a sabiendas de que un concreto trabajable reduce el vibrado para obtener una compactación óptima, reduce el costo de colocación por m<sup>3</sup> ya que el colado es más rápido y se reduce el número de obreros, además de, facilitar el bombeado a mayores distancias horizontales y verticales.

En general, los concretos fabricados dentro del laboratorio, ya sean estos los concretos testigos o concretos con HVFA, mostraron una buena trabajabilidad reflejada en el revenimiento alcanzado, pues solo los concretos llamados M2 no cumplieron con el revenimiento previamente determinado, según se muestra en la *Tabla III.6* y se ejemplifica en la *Fig. III.8*.

**Tabla III.6 REVENIMIENTO ALCANZADO POR LAS DIFERENTES MEZCLAS**

MEZCLA	RELACIÓN A/C	POZZOLITH 322 N [ml/m <sup>3</sup> ]	REVENIMIENTO [cm]
M1C200GA	0.83	933.00	15.16
M1HVFA200GA	0.83*	453.00	16.89
M2C250GA	0.64	1,100.00	4.63
M2HVFA250GA	0.64*	1,100.00	5.54
M3C300GA	0.60	1,000.00	17.97
M3HVFA300GA	0.60*	1,350.00	13.86

\* A/C = A/(C+FA)

La prueba de revenimiento se efectuó según lo estipulado en la norma ASTM-C-143 (*Fig. III.9*) y aunque en cifras no se ve muy claro los concretos con HVFA físicamente se notaban con mayor cohesión que los concretos testigo lo que permitió en algunos casos reducir el aditivo para cumplir con las medidas de revenimiento establecidas.

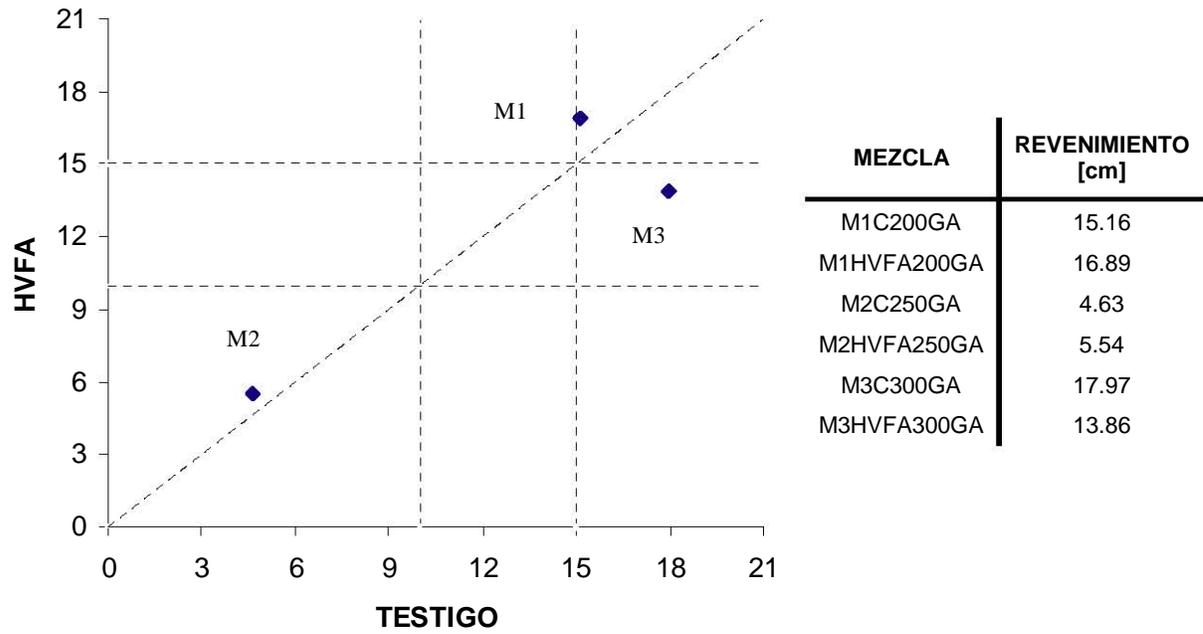


Fig. III.8 Revenimiento. TESTIGO VS HVFA



Fig. III.9 Prueba de revenimiento a una mezcla de concreto con HVFA

## CAPÍTULO IV

### CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS FABRICADOS CON CEMENTO PÓRTLAND Y CENIZA VOLANTE

En este capítulo se aúna a las metodologías implementadas de los ensayos en laboratorio descritas con anterioridad, la obtención de las características físico - mecánicas y de durabilidad, de diferentes concretos utilizados en los sistemas de construcción de viviendas, haciendo un análisis comparativo del comportamiento de concretos, testigo vs concretos con HVFA, a diferentes edades<sup>1</sup> (7, 14, 28 y 90 días).

A través de diversos ensayos mecánicos se evalúa el comportamiento de las seis mezclas de concreto (tres mezclas testigo y tres con HVFA). Las mezclas estudiadas fueron sometidas a ensayos para determinar la resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión, la contracción por secado, el módulo de elasticidad y relación de Poisson, mientras que para la estimación de la durabilidad se efectuaron las pruebas de resistencia a la permeabilidad de los cloruros y resistencia al ataque de sulfatos. Se ensayaron tres especímenes (uno por bachada) por prueba y fecha preparados según la norma correspondiente.

#### IV.1 RESISTENCIA MECÁNICA

El concreto de cemento Pórtland endurece y gana resistencia cuando se hidrata el cemento. El proceso de hidratación se extiende sobre un periodo de tiempo prolongado, al principio se presenta de manera rápida para luego disminuir con el tiempo. Medir la resistencia última del concreto requeriría de varios años. Esto no sería práctico, así que se seleccionó un período de 28 días como edad de prueba para el concreto. A esta edad se presenta un porcentaje importante de hidratación del cemento en los concretos testigo, pero en los concretos con HVFA la reacción puzolánica de la ceniza se desarrolla mas lentamente<sup>2</sup> como se visualiza en los resultados de los ensayos. Sin embargo, dados los estándares, la edad normativa de prueba será el lapso de 28 días.

##### IV.1.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Para determinar la resistencia a compresión del concreto, se fabricaron y ensayaron especímenes cilíndricos con dimensiones nominales de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM-C-39/C-39M, se llevaron a cabo los ensayos a las diferentes edades del concreto. Previo a los ensayos las probetas fueron pesadas y medidas para luego cabecearlas<sup>3</sup> con una capa de azufre (norma ASTM-C-617). Los resultados se muestran en la *Tabla IV.1* y *Fig. IV.1*.

<sup>1</sup> 7 y 14 días, solo en pruebas de resistencia a compresión

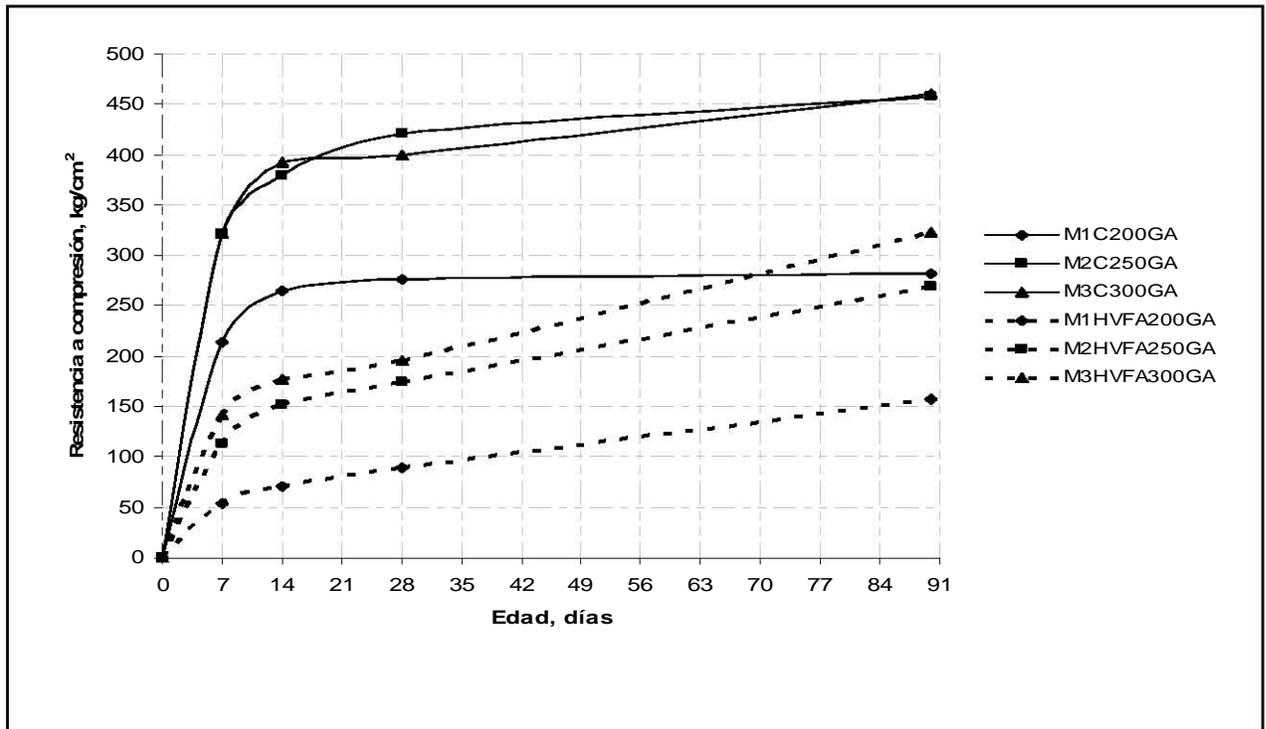
<sup>2</sup> Ya que se consigue como consecuencia de la combinación de las cenizas volantes con el hidróxido de calcio generado por la hidratación del cemento.

<sup>3</sup> Cabeceo con el propósito de garantizar uniformidad y paralelismo de las caras de apoyo durante la prueba

**TABLA IV.1 PROGRESO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TODOS LOS CONCRETOS, TESTIGO Y CON HVFA**

MEZCLA	Resistencia a la compresión*, kg/cm <sup>2</sup>				Resistencia normalizada a 28 días, %			Incremento de resistencia, 28-90 días
	7 días	14 días	28 días	90 días	7 días	14 días	28 días	
<b>TESTIGO</b>								
M1C200GA	213.89	265.32	276.01	281.62	77.49	96.13	100.00	2.03 %
M2C250GA	320.93	379.34	421.22	457.66	76.19	90.06	100.00	8.65 %
M3C300GA	322.11	392.90	399.63	460.53	80.60	98.32	100.00	15.24 %
<b>Con HVFA</b>								
M1HVFA200GA	53.69	71.49	89.43	157.88	60.04	79.94	100.00	76.54 %
M2HVFA250GA	113.90	151.41	173.81	268.93	65.53	87.11	100.00	54.73 %
M3HVFA300GA	141.84	176.52	196.03	322.41	72.36	90.05	100.00	64.47 %

\* la carga fue aplicada a razón de 25 ton/min, con ayuda de una maquina universal marca SATEC



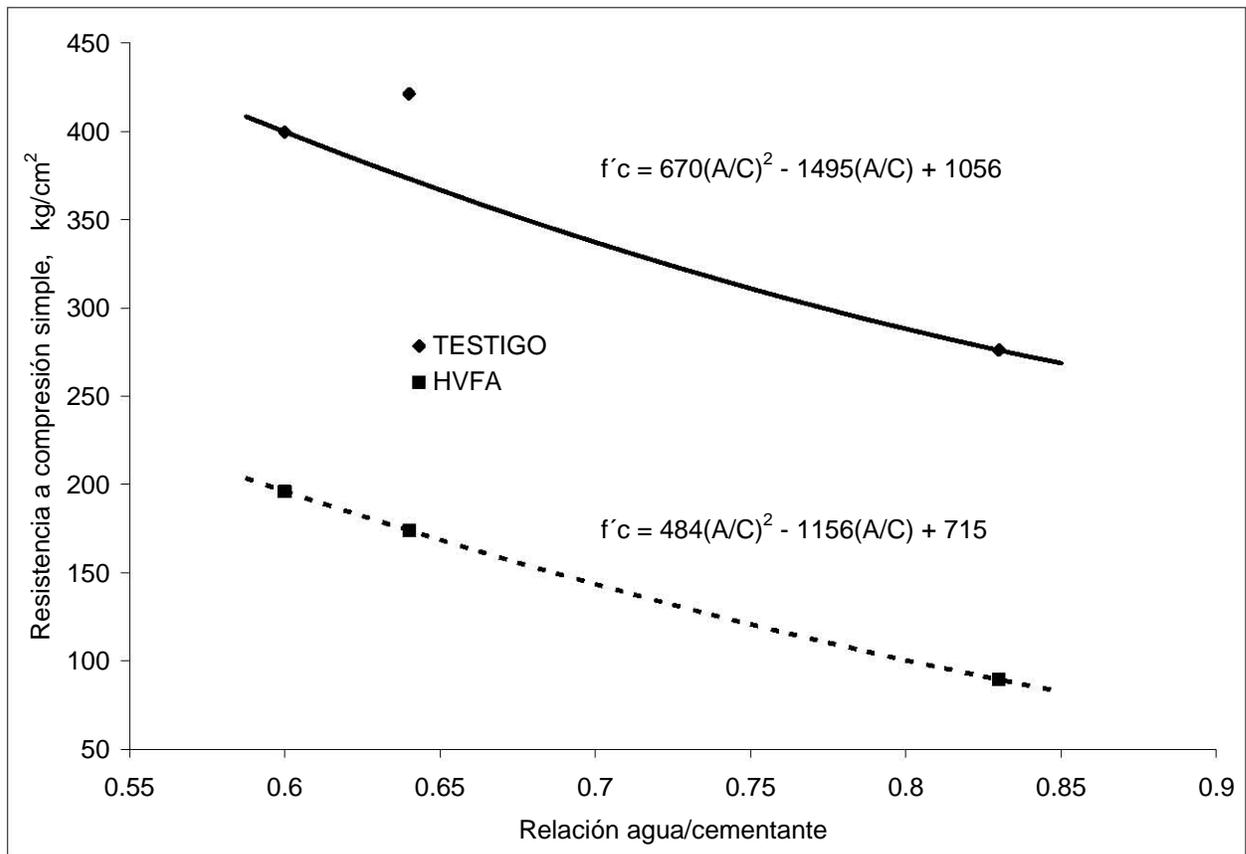
**Fig. IV.1** Resistencia a la compresión respecto al tiempo, de concretos Testigo y con HVFA

En el diseño y fabricación de los concretos, fue necesario conocer la correspondencia existente entre la relación A/C, tomando en cuenta que se empleó un aditivo reductor de agua para alcanzar el revenimiento de diseño, y la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días; dicha relación se muestra en la *Tabla IV.2* y *Fig. IV.2*.

**TABLA IV.2 CORRESPONDENCIA ENTRE RELACIÓN A/C – RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Tipo de Mezcla	Mezcla	Relación A/C	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>
TESTIGO	M1C200GA	0.83	276.01
	M2C250GA	0.64	421.22
	M3C300GA	0.60	399.63
Con HVFA	M1HVFA200GA	0.83*	89.43
	M2HVFA250GA	0.64*	173.81
	M3HVFA300GA	0.60*	196.03

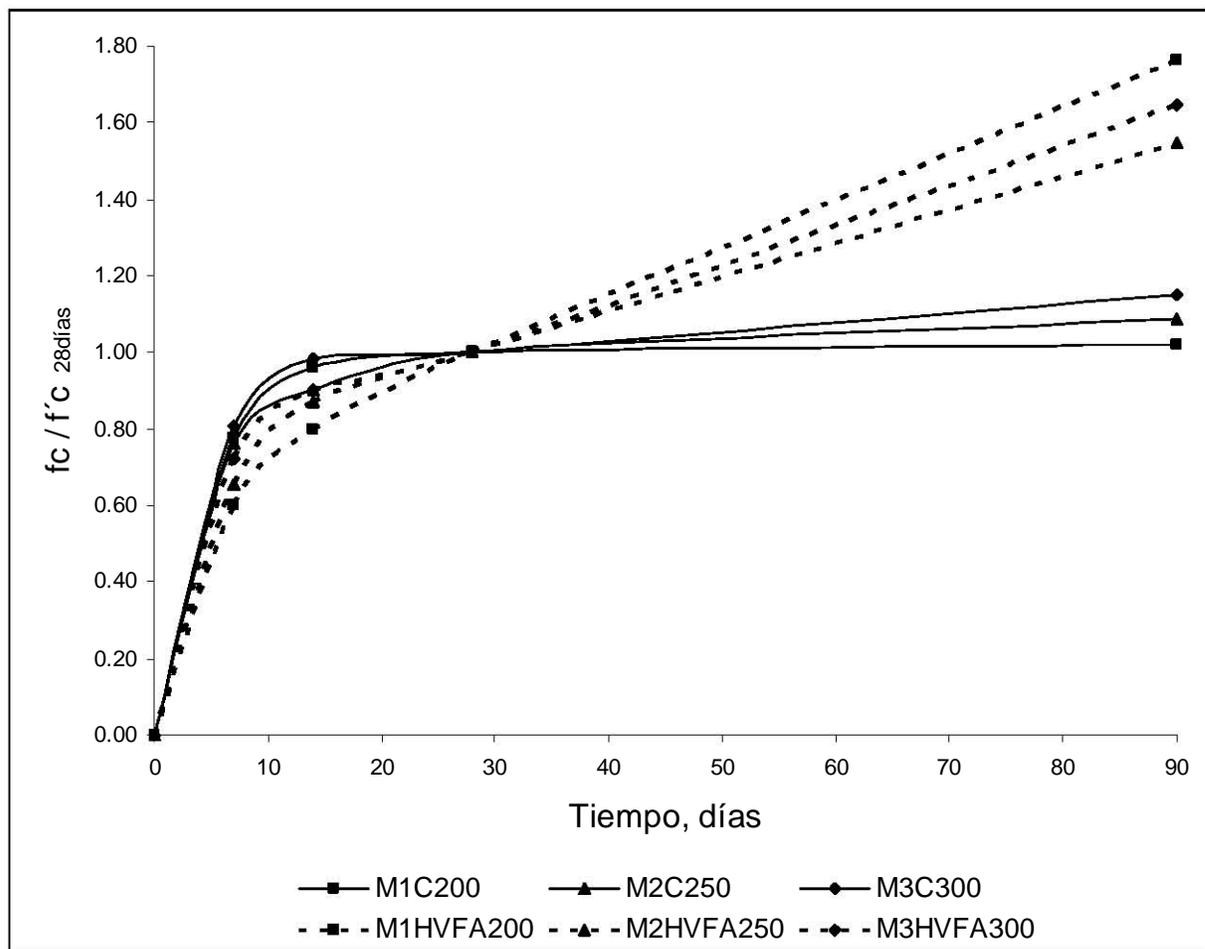
\* A/C = A/(C+FA)



**Fig. IV.2** Tendencia de la curva resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) y relación agua / cementante

La línea de tendencia y ecuación para  $f'_c$ , de los concretos testigo, muestra un comportamiento extraño esto debido a que un concreto (M2) con una relación A/C más alta muestra una mayor resistencia a compresión a los 28 días que un concreto (M3) con una menor relación A/C como se observó en la Fig. IV.1 y ratificó en la Fig. IV.2, Lo irónico es que para alcanzar una mayor resistencia la razón A/C debería disminuir (Ley de Abrams<sup>4</sup>).

Siguiendo con el estudio se analizarán los resultados de resistencia a la compresión, a las diferentes edades, respecto a las resistencias alcanzadas a los 28 días. Resultados mostrados en la Fig. IV.3 y Tabla IV.3, donde se observa que a la edad de 90 días se presenta una mayor dispersión, por parte de los concretos con HVFA.



**Fig. IV.3** Incrementos de resistencia a compresión con la edad respecto a  $f'_c$  28 días

**NOTA:** se observa que el concreto M1HVFA200 tuvo un giro inusual sobre los otros 2 concretos con HVFA, pues a la edad de 90 días les sobrepasa en ganancia de resistencia respecto a los 28 días,

<sup>4</sup> Ley según la cual para los mismos materiales y condiciones de ensayo la resistencia de un concreto completamente compactado a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación A/C

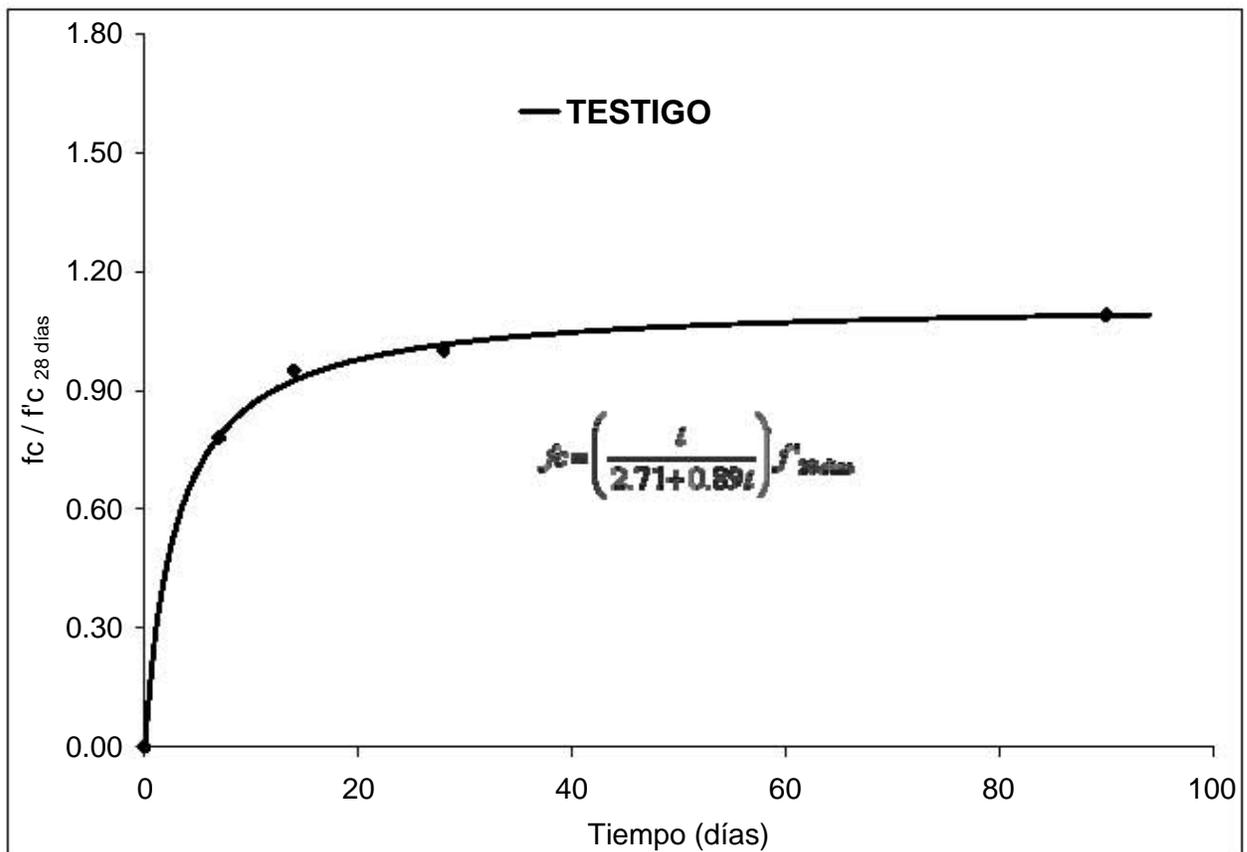
TABLA IV.3 VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON EL TIEMPO

Mezcla		Tiempo, días	Resistencia a compresión, kg/cm <sup>2</sup>	$f_c / f'_{c\ 28\ \text{días}}$
TESTIGO	M1C200GA	0	0	0.00
		7	214	0.77
		14	265	0.96
		28	276	1.00
		90	282	1.02
	M2C250GA	0	0	0.00
		7	321	0.76
		14	379	0.90
		28	421	1.00
		90	458	1.09
	M3C300GA	0	0	0.00
		7	322	0.81
		14	393	0.98
		28	400	1.00
		90	461	1.15
Con HVFA	M1HVFA200GA	0	0	0.00
		7	54	0.60
		14	71	0.80
		28	89	1.00
		90	158	1.77
	M2HVFA250GA	0	0	0.00
		7	114	0.66
		14	151	0.87
		28	174	1.00
		90	269	1.55
	M3HVFA300GA	0	0	0.00
		7	142	0.72
		14	177	0.90
		28	196	1.00
		90	322	1.64

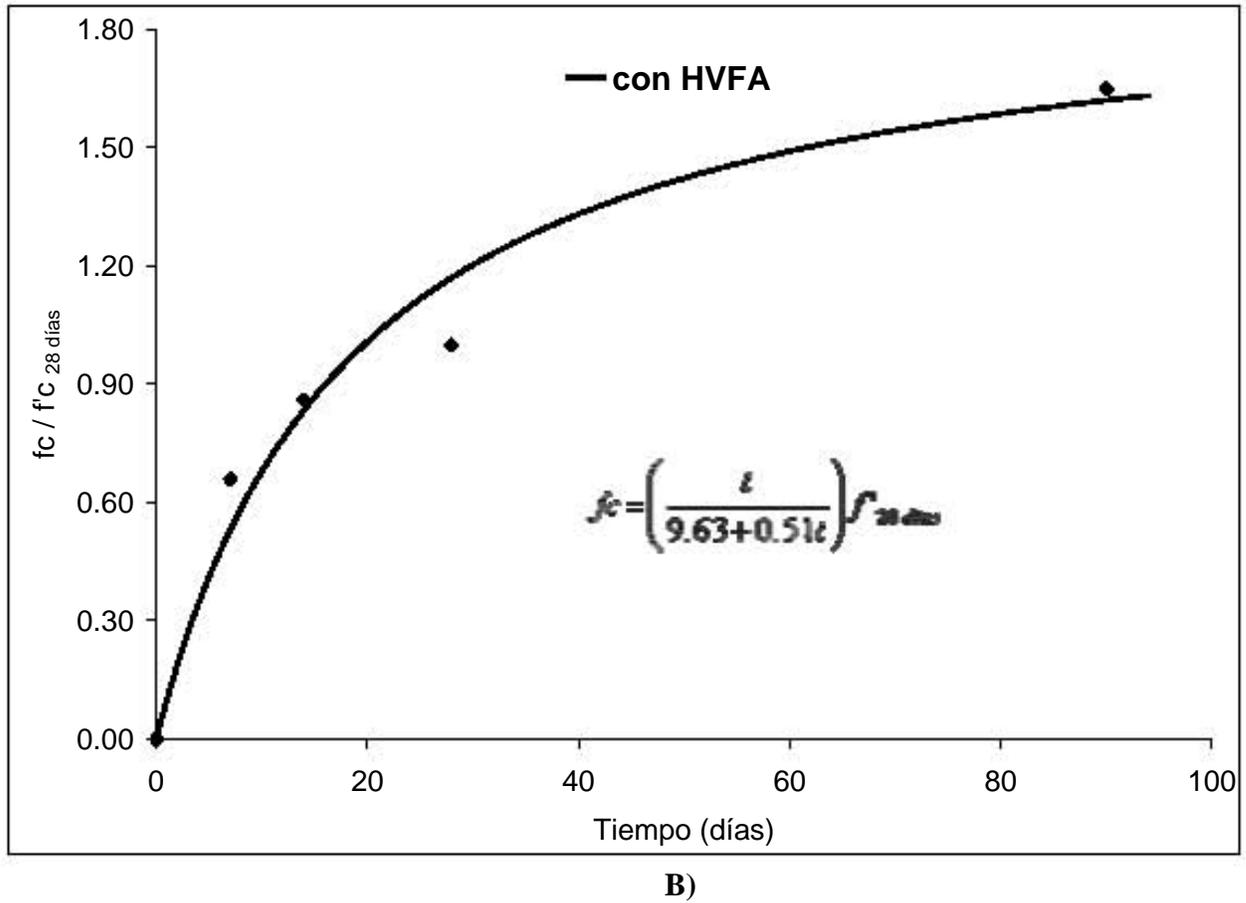
Para concluir con la prueba, se plantearán las expresiones algebraicas para estimar la resistencia de los concretos (Testigo y con HVFA) a cualquier edad a partir de  $f'_{c\ 28\ \text{días}}$ , para lo cual se hace uso de los valores de resistencia relativos a 28 días indicados en la *Tabla IV.4* y *Fig. IV.4*.

**TABLA IV.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PROMEDIO RELATIVA A LA DE 28 DÍAS**

Tipo de Mezcla	Edad, días	$f_c / f'_{c\ 28\ \text{días}}$
TESTIGO	0	0.00
	7	0.78
	14	0.95
	28	1.00
	90	1.09
HVFA	0	0.00
	7	0.66
	14	0.86
	28	1.00
	90	1.65



A)



**Fig. IV.4** Ecuación para estimar la resistencia a la edad  $t$  en los concretos de estudio, A) concreto testigo, B) concreto con HVFA

Las expresiones encontradas fueron las siguientes:

$$f_c = \left( \frac{t}{2.71 + 0.89t} \right) f'_{c_{28 \text{ días}}}$$

**Para: Concretos TESTIGO**

$$f_c = \left( \frac{t}{9.63 + 0.51t} \right) f'_{c_{28 \text{ días}}}$$

**Para: Concretos con HVFA**

Donde:

$f_c$  = Resistencia a compresión simple del concreto a  $t$  días después de colado,  $\text{kg/cm}^2$ .

$t$  = Edad en días a la que se busca estimar la resistencia  $f_c$ .

$f'_{C\ 28\ \text{días}}$  = Resistencia a compresión simple del concreto a 28 días después de colado,  $\text{kg/cm}^2$ .

Dándole a  $t$  el valor de 365, se estimará que resistencia a compresión simple tendrá el concreto de baja resistencia a dicha edad con respecto a  $f'_{C\ 28\ \text{días}}$ , los resultados son los siguientes:

- Concretos Testigo, **1.12**  $f'_{C\ 28\ \text{días}}$
- Concretos con HVFA, **1.86**  $f'_{C\ 28\ \text{días}}$



ESQUEMATIZACIÓN DE LA PRUEBA **RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE**

#### IV.1.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA

Teniendo en cuenta la norma ASTM-C-496 se efectuaron ensayos de tensión indirecta sobre las seis mezclas estudiadas para edades de 28 y 90 días, la prueba se efectuó en probetas cuyas dimensiones nominales son de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Los resultados de los ensayos se presentan en la *Tabla IV.5* y se analizan en la *Tabla IV.6*.

**TABLA IV.5 RESISTENCIAS A LA TENSIÓN INDIRECTA ALCANZADAS EN LAS PRUEBAS**

Mezcla		Edad, días	Resistencia a Compresión $f'_c$ , kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a Tensión $\bar{f}_t$ , kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{f}_t / \sqrt{f'_c}$
TESTIGO	M1C200GA	28	276.01	20.55	1.24
	M2C250GA		421.22	30.85	1.50
	M3C300GA		399.63	25.83	1.29
	M1C200GA	90	281.62	24.96	1.49
	M2C250GA		457.66	30.84	1.44
	M3C300GA		460.53	31.84	1.48
Con HVFA	M1HVFA200GA	28	89.43	9.45	1.00
	M2HVFA250GA		173.81	14.56	1.10
	M3HVFA300GA		196.03	17.72	1.27
	M1HVFA200GA	90	157.88	16.10	1.28
	M2HVFA250GA		268.93	22.04	1.34
	M3HVFA300GA		322.41	25.11	1.40

**TABLA IV.6 INCREMENTO (%) DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA**

Mezcla	M1 C200GA	M2 C250GA	M3 C300GA	M1 HVFA200GA	M2 HVFA250GA	M3 HVFA300GA
Incremento de resistencia de 28-90 días, %	21.46	0.00	23.27	70.37	51.37	41.70

A excepción de la mezcla M2C250GA<sup>5</sup> los valores de resistencia a la tensión indirecta, al igual que los valores de resistencia a compresión simple, son proporcionales al contenido de cementante y se ven incrementados con respecto al tiempo; mostrando un incremento mayor los concretos con HVFA.

Con ayuda de la *Fig. IV.5*, se obtendrá la expresión que permitirá relacionar la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

<sup>5</sup> como se observa en las dos pruebas anteriores, tuvo un rápido desarrollo de resistencia a la edad de 28 días y un estancamiento hasta los 90 días

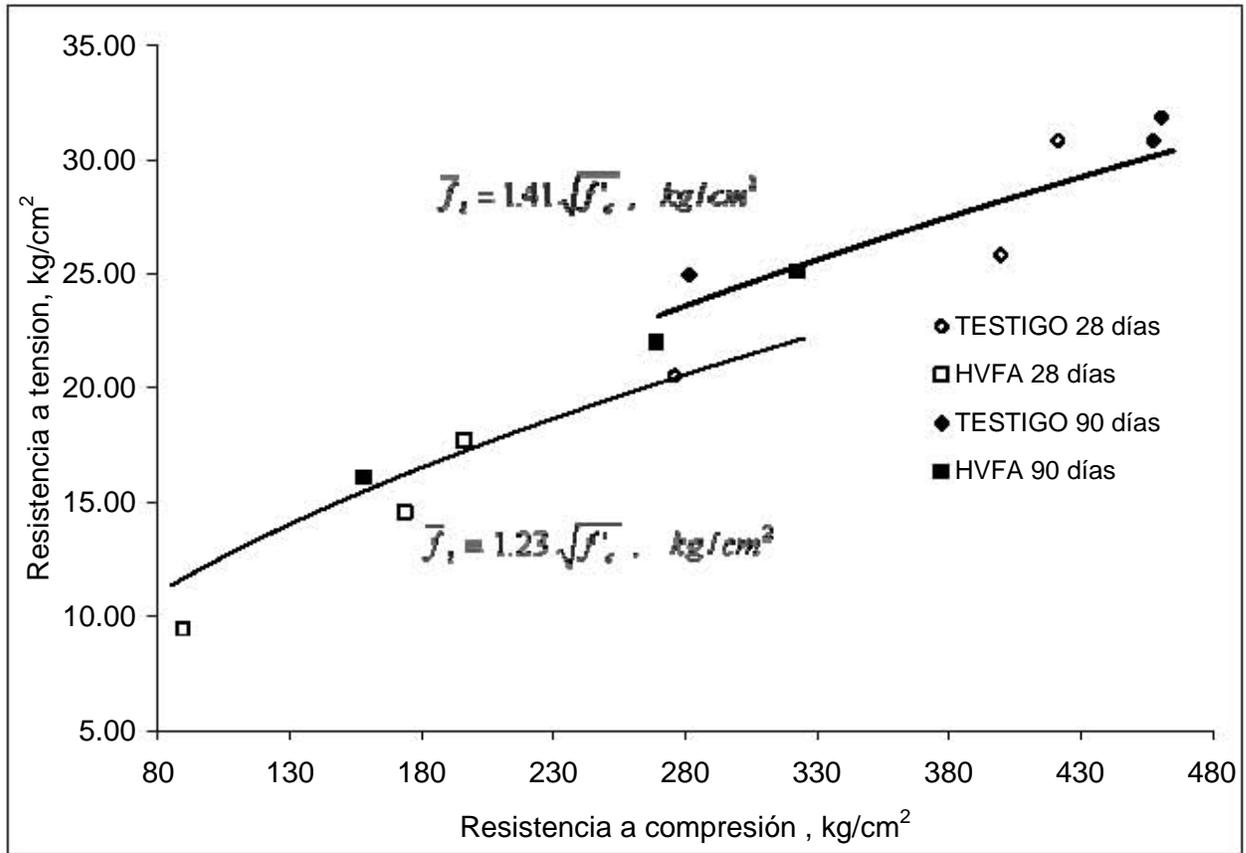


Fig. IV.5 Resistencia a tensión indirecta en función de  $\sqrt{f'_c}$

Las expresiones obtenidas que relacionan a estos dos parámetros son:

**TESTIGO**

$$\bar{f}_t = 1.41 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$$

**HVFA**

$$\bar{f}_t = 1.23 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$$

Según la norma **NMX-C-163**

Para Concretos **Clase 1**  $\bar{f}_t = 1.5 \sqrt{f'_c}$

Para Concretos **Clase 2**  $\bar{f}_t = 1.2 \sqrt{f'_c}$

**Donde:**

$f'_c$  = Resistencia Especifica del Concreto a Compresión, kg/cm<sup>2</sup>

$\bar{f}_t$  = Resistencia Media del Concreto a Tensión, kg/cm<sup>2</sup>

### IV.1.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD ( $E_c$ ) Y RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )

Se estimó el módulo de elasticidad ( $E_c$ ) y relación de Poisson ( $\mu$ ) para las seis mezclas, conforme a la norma ASTM-C-469, aplicando la carga con una velocidad de 25 ton/min. Se ensayaron un total de 18 cilindros (3 por mezcla) de dimensiones nominales de 30 cm de altura por 15 cm de diámetro.

Cada probeta fue sometida a cinco ciclos de carga al 40% de la carga máxima promedio soportada por los especímenes a compresión, en la mayoría de los casos las probetas se llevaron a la ruptura durante el quinto ciclo. Los módulos de elasticidad y las relaciones de Poisson promedio obtenidos con los ensayos se resumen en la *Tabla IV.7*.

**TABLA IV.7 MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON PARA LOS CONCRETOS (TESTIGO Y CON HVFA)**

Mezcla	Edad, días	Resistencia a Compresión* ( $f'_c$ ), kg/cm <sup>2</sup>	$\sqrt{f'_c}$	Módulo de elasticidad ( $E_c$ ), kg/cm <sup>2</sup>	Relación De Poisson ( $\mu$ )	$E_c/\sqrt{f'_c}$	
TESTIGO	M1C200GA	275.36	16.59	148,543.88	0.25	8,952	
	M2C250GA	421.93	20.54	173,502.71	0.27	8,447	
	M3C300GA	412.07	20.30	175,617.91	0.29	8,651	
	M1C200GA	297.72	17.25	177,695.18	0.28	10,298	
	M2C250GA	457.66 **	21.39	202,249.42	0.28	9,454	
	M3C300GA	470.57	21.69	195,892.79	0.30	9,030	
	Promedio					0.28	9,139
	HVFA	M1HVFA200GA	88.57	9.41	103,898.52	0.17	11,040
		M2HVFA250GA	173.32	13.17	134,329.78	0.22	10,203
M3HVFA300GA		201.69	14.20	141,596.91	0.25	9,970	
M1HVFA200GA		163.40	12.78	141,921.66	0.23	11,103	
M2HVFA250GA		274.14	16.56	163,549.92	0.28	9,878	
M3HVFA300GA		323.46	17.98	170,362.85	0.26	9,473	
Promedio					0.23	10,278	

\* Obtenida con la carga alcanzada durante el quinto ciclo, resistencia a la compresión en valor promedio

\*\* Dado que la probeta no se llevo a la falla, se colocó el valor alcanzado en la prueba de resistencia a compresión simple

Con los valores obtenidos en las pruebas, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson se relacionan con la resistencia a compresión simple del concreto de la manera siguiente (Fig. IV.6 y Fig. IV.7 respectivamente).

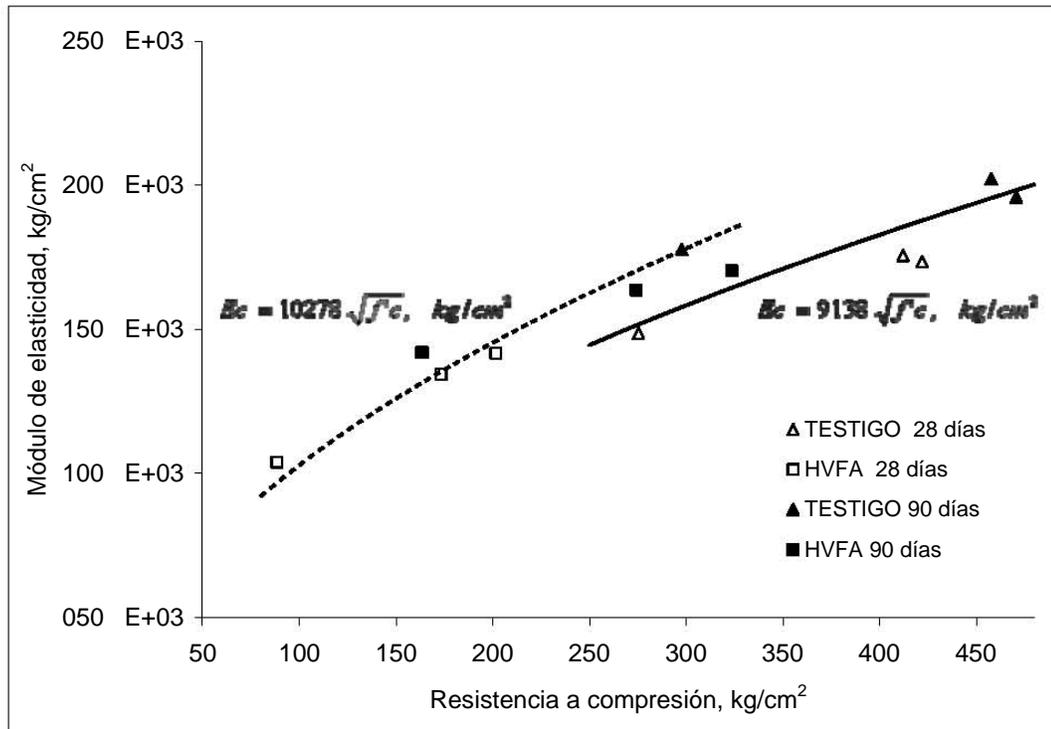


Fig. IV.6 Variación del módulo de elasticidad de los concretos (TESTIGO y con HVFA)

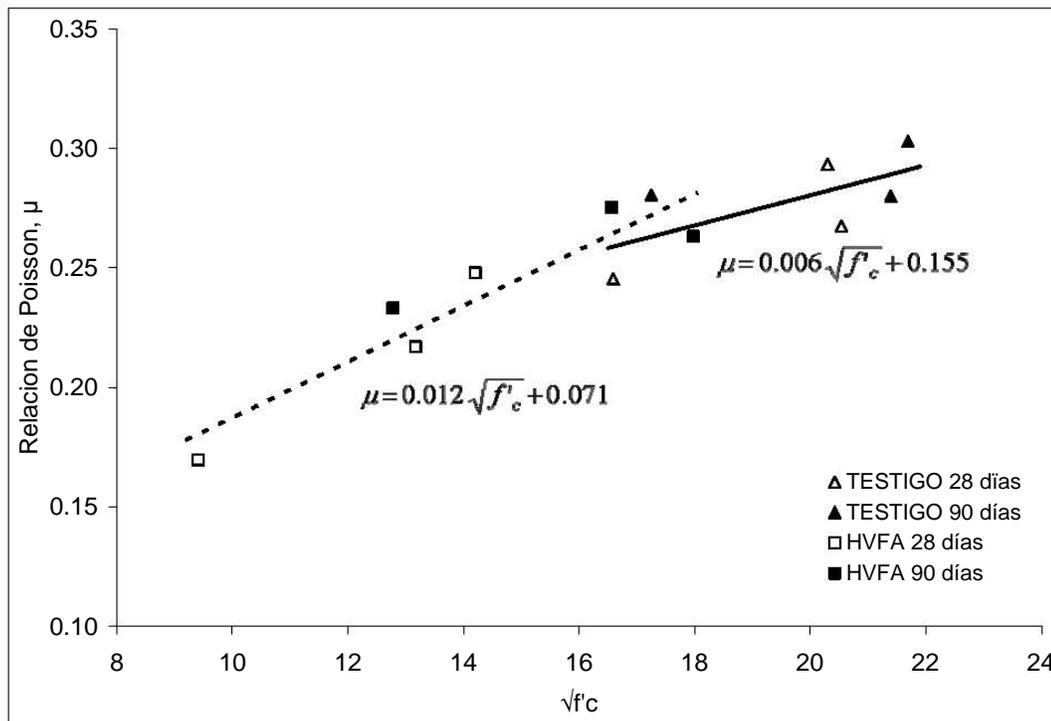


Fig. IV.7 Variación de la relación de Poisson con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, en los concretos (TESTIGO y con HVFA)

Con los resultados obtenidos en las pruebas las expresiones que estiman el valor del módulo de elasticidad y de la relación de Poisson con respecto a la resistencia a compresión del concreto son:

TESTIGO	
$E_c = 9138 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$	$\mu = 0.006 \sqrt{f'_c} + 0.155$
Con HVFA	
$E_c = 10278 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$	$\mu = 0.012 \sqrt{f'_c} + 0.071$

Para el módulo de elasticidad, los concretos testigo y con HVFA reflejan una misma tendencia, con valores de módulo un poco mas elevados en los concretos testigo pero que esperan verse alcanzados con el tiempo. Aun así los dos tipos de concreto están dentro de la clasificación de los concretos **Clase 2**, según las N.T.C. donde  $E_c = 8,000 \sqrt{f'_c}$ , en  $\text{kg/cm}^2$ .

En cuanto a la relación de Poisson, los valores de  $\mu$  son menores para los concretos con HVFA pero marcan una clara tendencia a la alza, mientras que los valores para los concretos testigo aparentan una tendencia hacia la aglomeración. En general se presentan valores de relación de Poisson en el concreto por encima de la variación esperada de entre **0.15 a 0.20**.



En la imagen de arriba se observa el procedimiento efectuado en la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson, para lo cual se utilizó un compresómetro para determinar las deformaciones longitudinales y transversales en las probetas de concreto de 15x30cm, que incluía un extensómetro y un software que proporcionaba lecturas en cuatro canales a cada 2 segundos.

### IV.1.4 CONTRACCIÓN POR SECADO

La prueba de contracción por secado se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM-C-157. El método de la prueba implica medir el cambio de la longitud de barras prismáticas de concreto de 75 mm x 75 mm x 250 mm (3 in x 3 in x 10 in). Los especímenes fueron fabricados en moldes de acero según la **ASTM-C-192**, “Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory” (Práctica para la Elaboración y Curando de Especímenes de Prueba de Concreto en el Laboratorio). 24 horas después de su fabricación, los especímenes fueron retirados de los moldes de acero tomando las medidas iniciales, enseguida los especímenes fueron llevados al cuarto de curado húmedo y colocados dentro de recipientes con agua saturada de cal. Los especímenes se mantuvieron en la solución dentro de la cámara de curado por un período de 28 días, después de este lapso de tiempo los especímenes fueron retirados de la solución y puestos en un ambiente controlado de 23 °C ± 2 °C y de humedad relativa del 50% ± 4%.

**TABLA IV.8 EXPRESIONES PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONTRACCIÓN POR SECADO**

Mezcla	Relación A/C	Ecuación para predecir la contracción	Porcentaje de la contracción respecto a la última, %			
			28 días	90 días	365 días	
TESTIGO	M1C200GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{10.5 + t} \right) 832 \times 10^{-6}$	73	90	97
	M2C250GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{10.3 + t} \right) 909 \times 10^{-6}$	73	90	97
	M3C300GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{13.8 + t} \right) 744 \times 10^{-6}$	67	87	96
	Promedio			71	89	97
Con HVFA	M1HVFA200GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{12.1 + t} \right) 1022 \times 10^{-6}$	70	88	97
	M2HVFA250GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{11.8 + t} \right) 903 \times 10^{-6}$	70	88	97
	M3HVFA300GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{12.2 + t} \right) 993 \times 10^{-6}$	70	88	97
	Promedio			70	88	97

Las medidas subsecuentes sirvieron para la estimación de los valores de la contracción por secado última ( $\epsilon_u$ ), tomando registro por 24 semanas<sup>6</sup> (168 días). En las graficas (Fig. IV.8 a IV.10) se muestran los valores alcanzados y las expresiones obtenidas con ellos que relacionan el valor de contracción con el tiempo de exposición transcurrido, en la Tabla IV.8 se presentan las ecuaciones encontradas para determinar la contracción a cualquier edad,  $\epsilon_t$ , en días; señalando el porcentaje (respectó al valor último estimado) de contracción que se alcanza a 28, 90 y 365 días.

En general para una relación de Agua/Cementante más baja se origina un cociente contracción más bajo; sin embargo, para las mezclas **M2** no fue así. La contracción más alta se presenta en las mezclas con HVFA, aunque en las ya citadas mezclas M2 la contracción mostrada por ambas mezclas es muy similar.

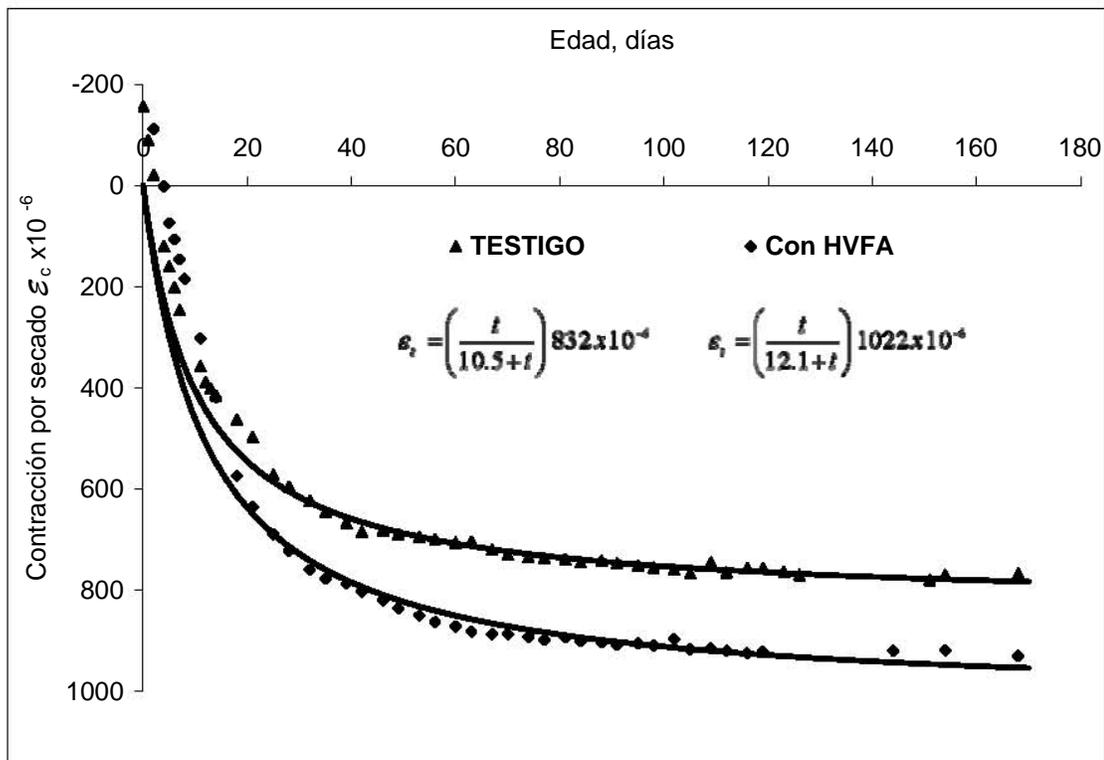


Fig. IV.8 Variación de la contracción por secado con el tiempo (M1, concretos con 200 kg/m<sup>3</sup> de cementante)

<sup>6</sup> Para las primeras 8 semanas se tomó registro de 6 barras prismáticas por mezcla (alcanzado este lapso de tiempo 3 barras fueron retiradas y ocupadas en la prueba de **resistencia a los sulfatos**). Para la mezcla **M3C300GA**, la edad de registro fue hasta las 32 semanas.

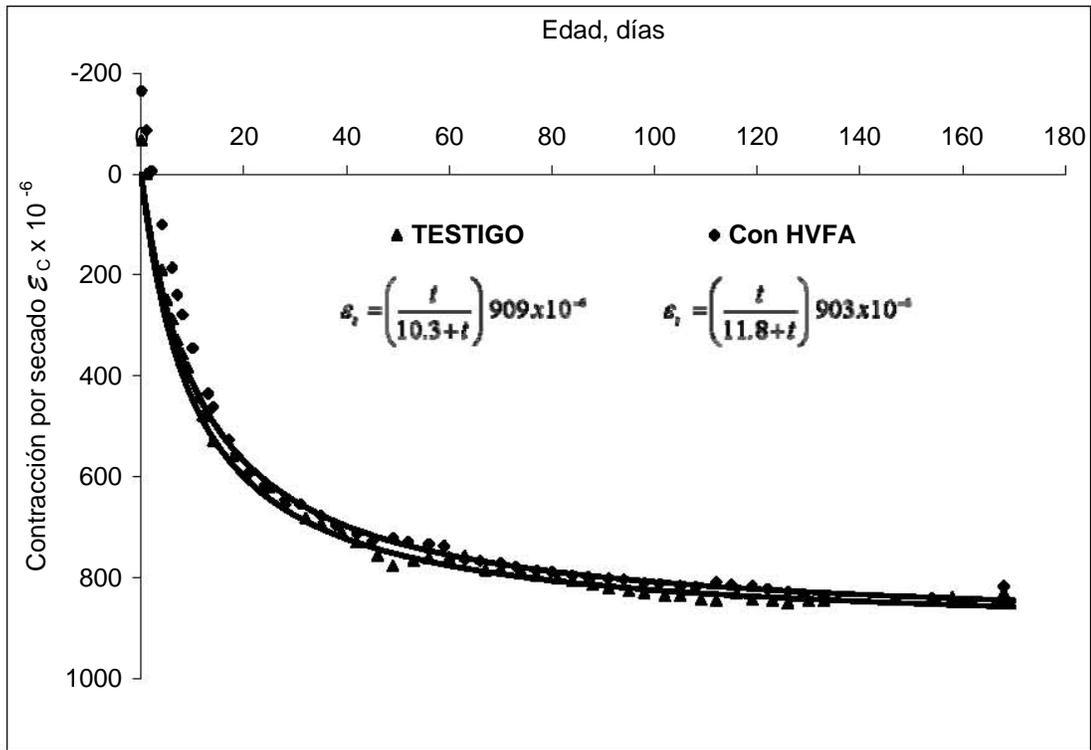


Fig. IV.9 Variación de la contracción por secado con el tiempo (M2, concretos con 250 kg/m<sup>3</sup> de cementante)

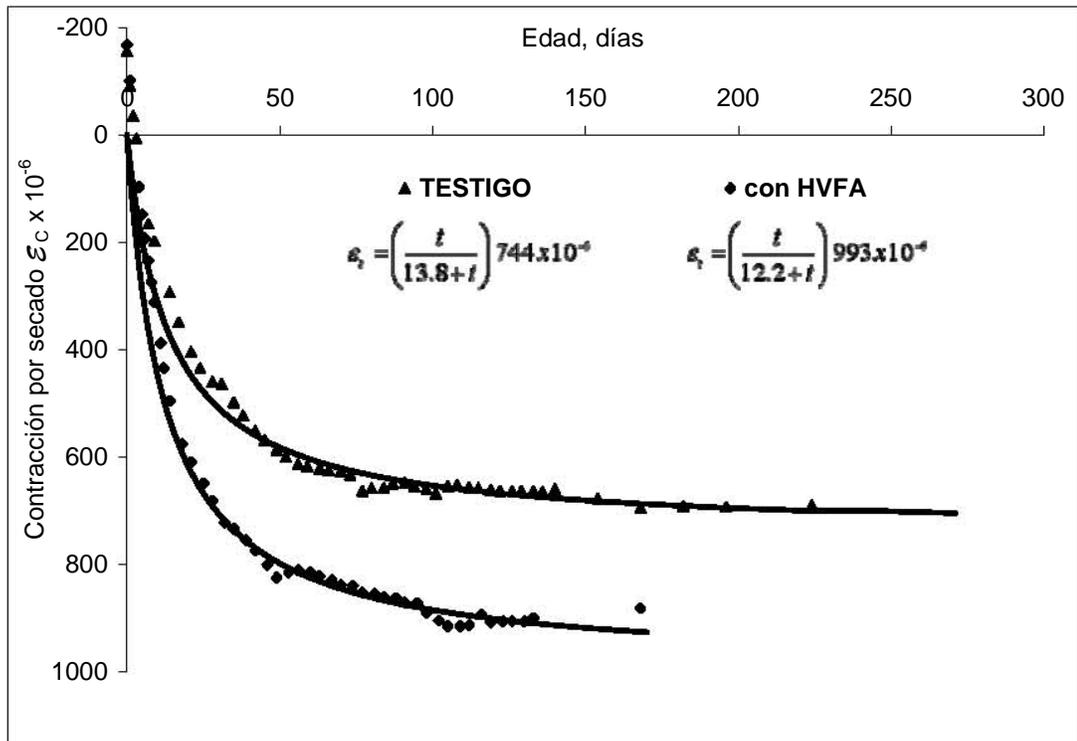


Fig. IV.10 Variación de la contracción por secado con el tiempo (M3, concretos con 300 kg/m<sup>3</sup> de cementante)

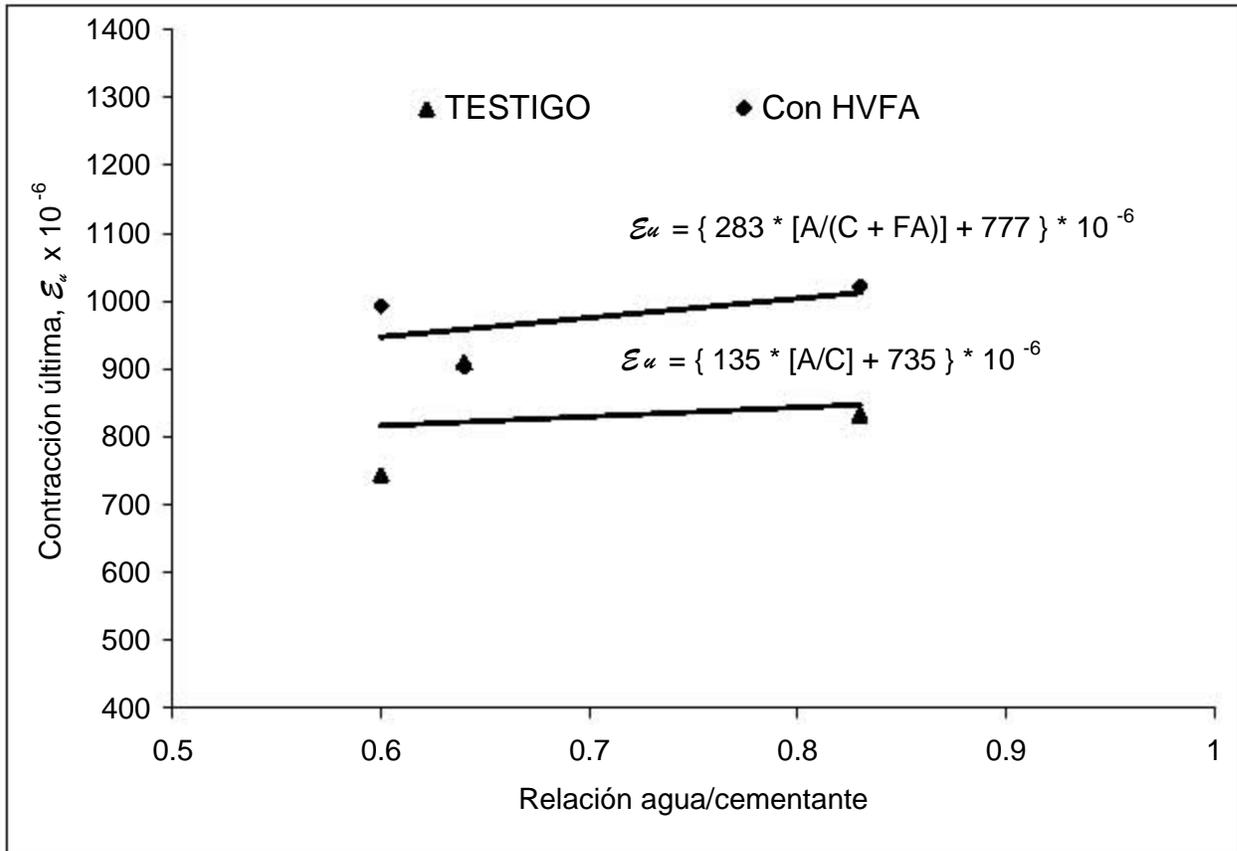


Fig. IV.11 Variación de la contracción por secado última ( $\epsilon_u$ ) con la relación Agua/Cementante



MEDICIÓN DE BARRAS PRISMÁTICAS DE CONCRETO DE ACUERDO CON LA NORMA ASTM-C-157

## IV.2 DURABILIDAD

En el análisis de las propiedades del concreto es importante recordar que ellas están íntimamente asociadas con las características y proporciones relativas de los materiales integrantes. Punto clave en este trabajo de investigación es el referente a la durabilidad, propiedad asociada con la permeabilidad (resistencia a la penetración del ion cloruro y resistencia al ataque de sulfatos), que espera verse incrementada con la implementación de las cenizas volantes en el proceso de fabricación del concreto.

Los factores que influyen en la permeabilidad del concreto, son en general los factores que influyen en la calidad del concreto como: la selección de los materiales y las proporciones de estos, el proceso de fabricación, colocación y curado del concreto. Un concreto, cuanto más permeable sea, tendrá una posibilidad de absorción capilar más importante; la permeabilidad y la capilaridad, comprenden fenómenos físicos que tienen interdependencia.

En la Tecnología del Concreto que pretende sustentar este trabajo es de suma importancia la permeabilidad; la intención es tratar de disminuirla por las evidentes consecuencias negativas que trae en cuanto a la durabilidad.

### IV.2.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO

La permeabilidad del concreto en esta prueba se evaluará por la resistencia a la penetración del ion cloruro, con base en la norma ASTM-C-1202, a 28 y 90 días, donde se mide la carga total en Coulombs que atraviesa a los especímenes de concreto durante un periodo de seis horas bajo un voltaje de corriente de 60 V. Los resultados se muestran en la *Tabla IV.9* y *Figs. IV.12* y *IV.13*.

**TABLA IV.9 RESISTENCIA DE LOS CONCRETOS A LA PENETRACIÓN DE ION CLORURO. CARGA TOTAL FILTRADA, COULOMBS (ASTM-C-1202)**

Tipo de Mezcla	Mezcla	Relación A/C	Permeabilidad, Coulombs		Penetrabilidad Ion Cloruro	
			28 días	90 días	28 días	90 días
TESTIGO	M1 C200 GA	0.83	5,718	3,069	Alta	Moderada
	M2 C250 GA	0.64	4,266	2,368	Alta	Moderada
	M3 C300 GA	0.60	4,913	3,191	Alta	Moderada
HVFA	M1 HVFA200 GA	0.83*	6,233	1,141	Alta	Baja
	M2 HVFA250 GA	0.64*	6,327	633	Alta	Muy Baja
	M3 HVFA300 GA	0.60*	6,839	801	Alta	Muy Baja

\* Relación A/C = relación A/(C+FA)

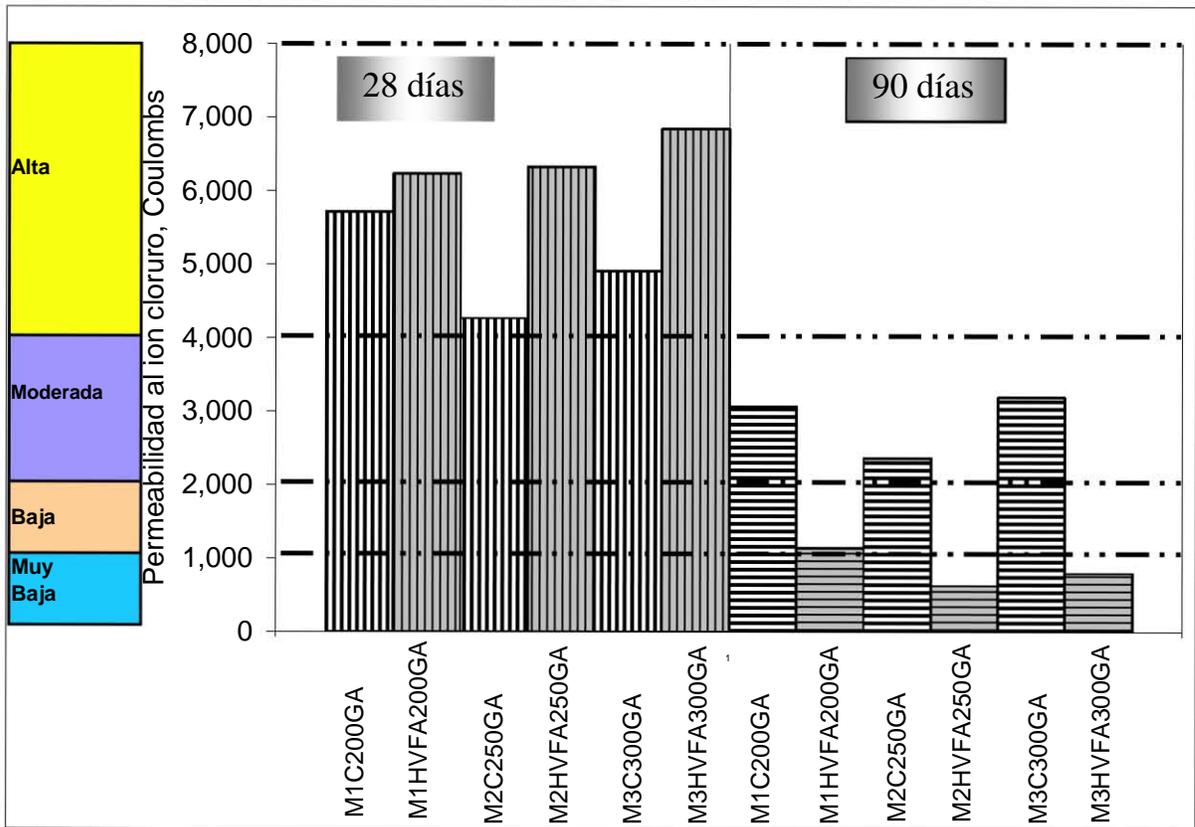


Fig. IV.12 Permeabilidad al ion cloruro a 28 y 90 días

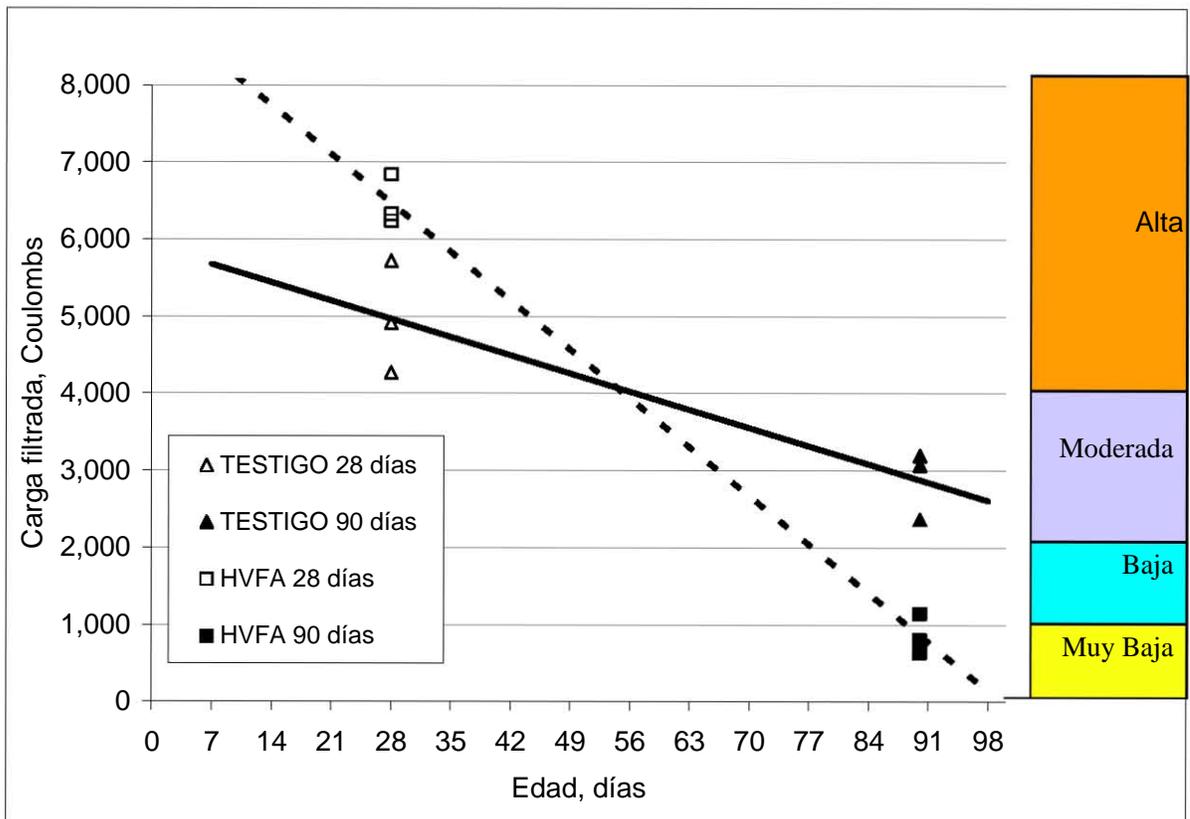
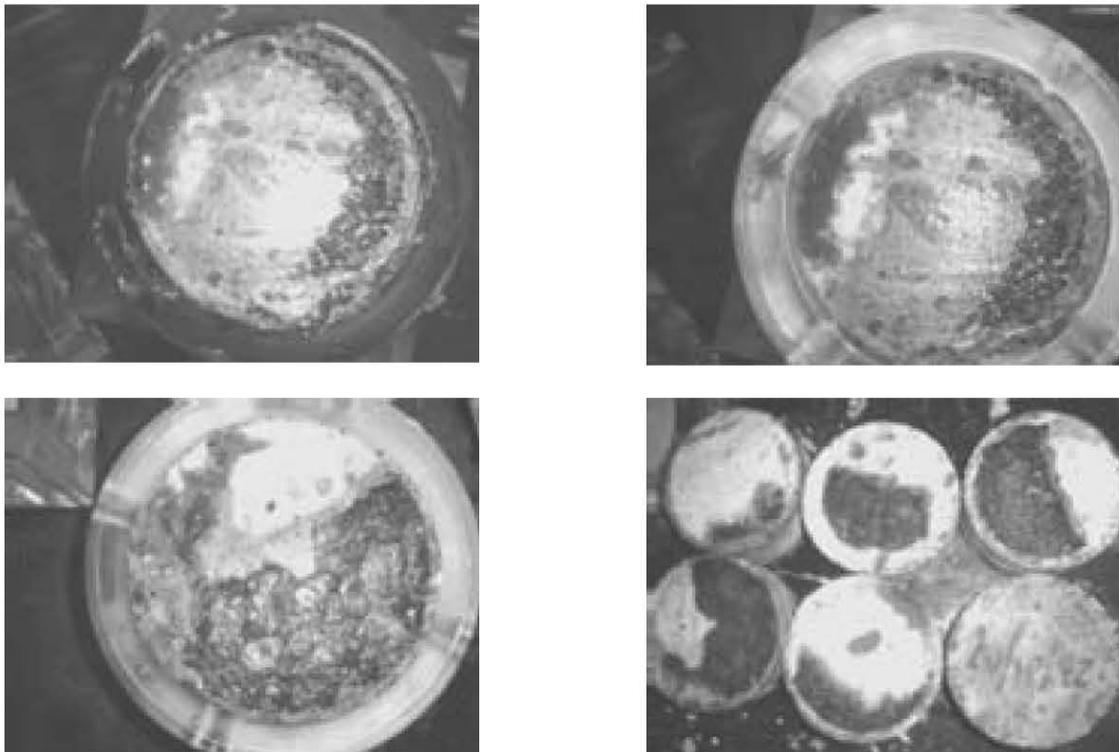


Fig. IV.13 Variación en la carga filtrada en el concreto con la edad

La tendencia de los datos presentados sobre la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro demuestran que los concretos con HVFA son más resistente a la penetración del ion-cloruro que los concretos testigo. De hecho, la resistencia a la penetración del ion cloruro determinada resultó perceptiblemente más alta para los concretos con HVFA. A 90 días, la carga total filtrada, en Coulombs, resultó ser menor a los 1000 Coulombs para los concretos con HVFA comparados con los cerca de 3000 Coulombs para los concretos Testigo. Esto debido principalmente a la incorporación de las cenizas volantes como material cementante dando lugar a poros más finos en la pasta cementante hidratada.

La única situación desfavorable presentada por los concretos con HVFA ocurrió en las pruebas realizadas a los 28 días, donde las probetas de estos concretos tuvieron una reacción anormal exteriorizando una costra de tonalidad café que tiñó a la solución de Hidróxido de sodio (*Fig. IV.14*). Dicha reacción (sin referente en ninguno de los estudios consultados) pudo causar el alza en el flujo de carga a esta edad.



**Fig. IV.14** Probetas después de prueba a resistencia a la penetración de ion cloruro a 28 días

## IV.2.2 RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS

La prueba de resistencia al ataque de sulfatos se llevó de acuerdo con la norma ASTM-C-1012 modificada, establecida para medir el cambio de longitud del concreto dentro de una solución de sulfato. Los especímenes de prueba consistieron en barras prismáticas (3 por mezcla) de 75 mm x 75 mm x 250 mm (3 in x 3 in x 10 in), fabricados y curados de manera idéntica a los utilizados en la prueba de contracción por secado (de hecho, estos también se emplearon en la prueba). A la edad de 90 días fueron extraídos de la cámara de curado en seco (ambiente controlado de 23 °C ± 2 °C y de humedad relativa del 50% ± 4%) y depositados en la solución de sulfato de sodio, donde permanecerán por varios años.

Las barras tienen siete lecturas de medición (excepto la mezcla M3C300GA), cuatro durante el primer mes (una por semana), una pasados dos meses y otra al transcurrir cuatro meses, la séptima lectura es la tomada aun dentro de la cámara de curado en seco antes de ser depositados los especímenes en el sulfato (esta fue considerada como la lectura inicial, edad cero); la mezcla M3C300GA cuenta con más lecturas debido a su mayor edad de fabricación. En las Figuras (IV.15 – IV.17) y en la Tabla IV.10 se observan los resultados obtenidos en la prueba.

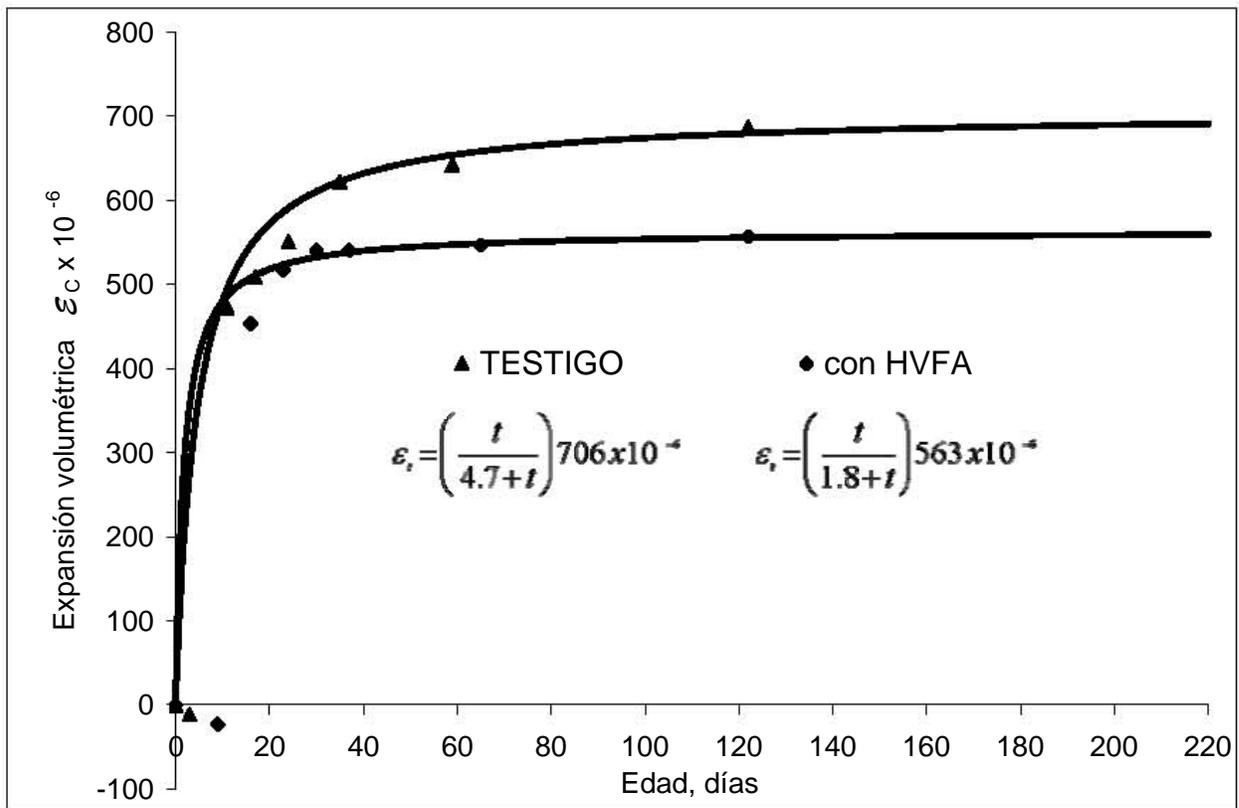
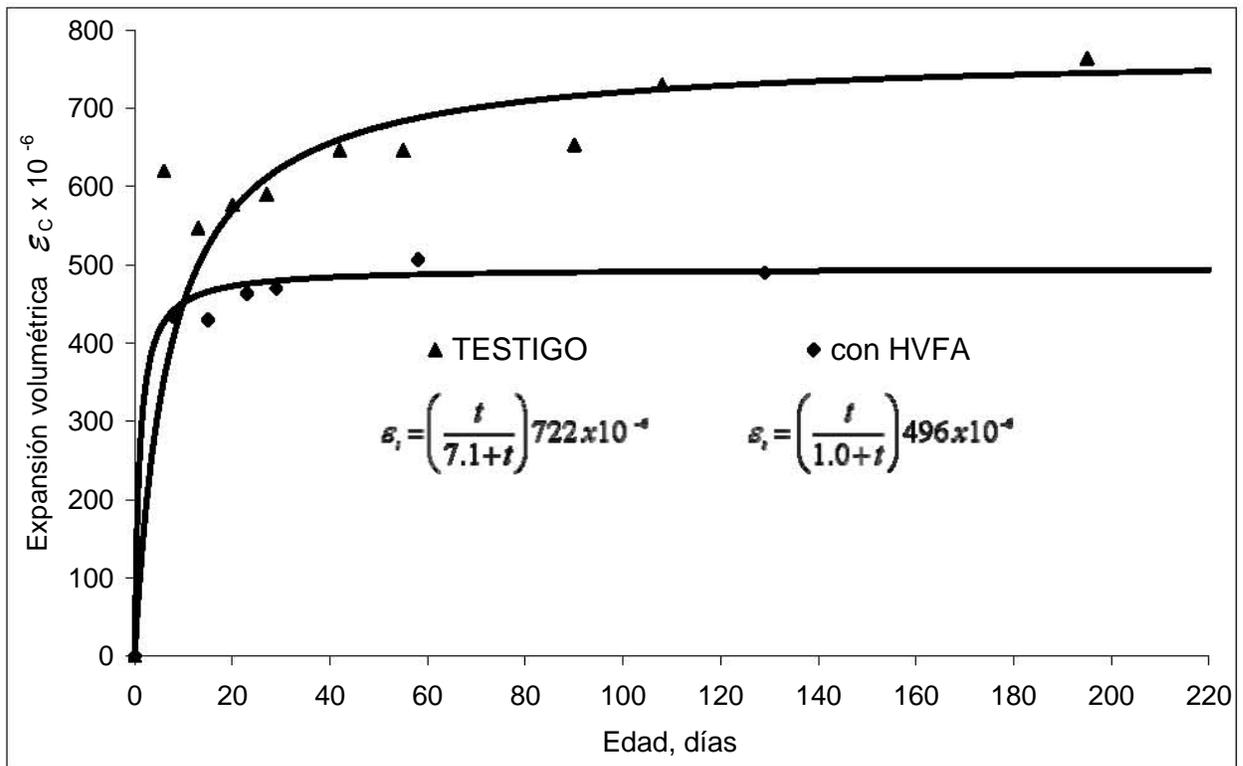
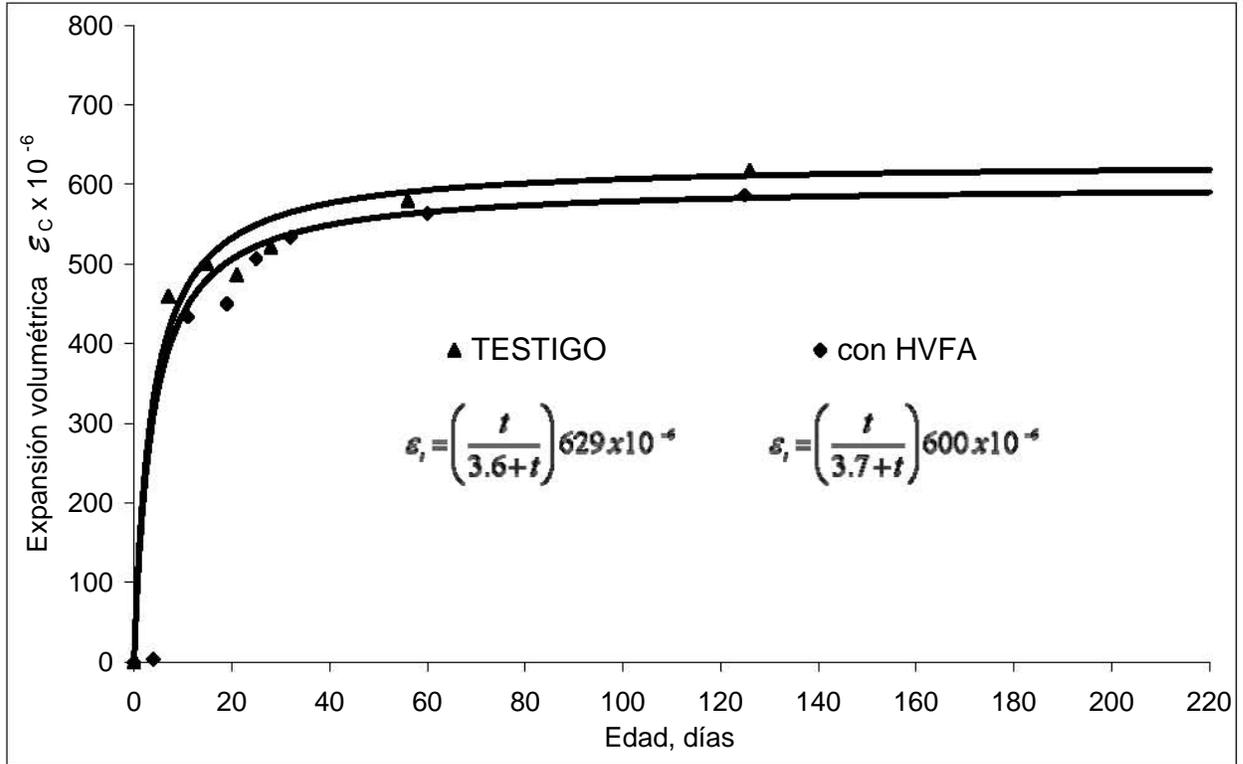


Fig. IV.15 Variación de la expansión volumétrica a causa del sulfato con el tiempo (M1, concretos con 200 kg/m<sup>3</sup> de cementante)



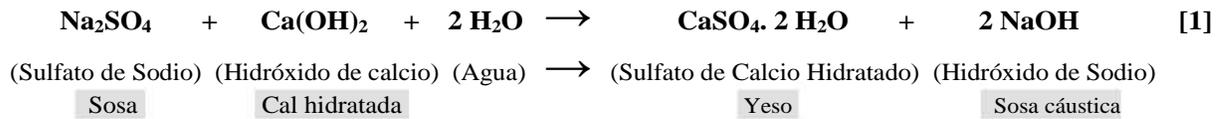
**TABLA IV.10 EXPRESIONES PARA LA PREDICCIÓN DE LA EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA A CAUSA DEL SULFATO**

Mezcla	Relación A/C	Ecuación para predecir la expansión	Porcentaje de la expansión respecto a la última, %		
			28 días	90 días	365 días
TESTIGO	M1C200GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{4.7 + t} \right) 710 \times 10^{-6}$	86	95	99
	M2C250GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{3.6 + t} \right) 629 \times 10^{-6}$	89	96	99
	M3C300GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{7.1 + t} \right) 722 \times 10^{-6}$	80	93	98
	Promedio			85	95
Con HVFA	M1HVFA200GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.8 + t} \right) 563 \times 10^{-6}$	94	98	100
	M2HVFA250GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{3.7 + t} \right) 600 \times 10^{-6}$	88	96	99
	M3HVFA300GA	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.0 + t} \right) 496 \times 10^{-6}$	97	99	100
	Promedio			93	98

Mediante el estudio realizado a los especímenes prismáticos de concreto expuesto a una solución de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) al 5 por ciento durante 4 meses, se observa lo siguiente:

Dado el corto tiempo de observación; ninguno de los especímenes, tanto de concretos Testigo como de concretos con HVFA, muestra deterioro superficial y están en buenas condiciones.

Los especímenes de concreto con HVFA muestran una leve ventaja sobre el concreto Testigo en cuanto a expansión volumétrica. Se considera que el incremento en la resistencia al ataque de sulfatos en el concreto con HVFA se debe principalmente a las propiedades puzolánicas que ostentan las cenizas volantes, disminuyendo la permeabilidad del concreto y, por lo tanto, el ingreso o la penetración de los iones de sulfato. Los sulfatos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio, formado durante la hidratación de los componentes del cemento, produciéndose sulfato de calcio (yeso) [1], que es un compuesto expansivo.



En general el deterioro del concreto debido al ataque del sulfato se considera un problema complejo que depende de muchos parámetros relacionados con los materiales y las condiciones de exposición.



En la imagen se observan los especímenes prismáticos de concreto dentro de la solución de sulfato de sodio al 5%. Los especímenes se conservaran en dicha solución por un periodo prolongado de tiempo para continuar con su estudio.

**NOTA:** Los resultados de las pruebas a los cilindros se pueden observar dentro del **APÉNDICE 3**

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### V.1 CONCLUSIONES

#### CAPÍTULO I. “REQUERIMIENTOS PARA EL CONCRETO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL”

1. La caracterización de los materiales y las tecnologías empleados en la construcción de vivienda de interés social deberá considerar fundamentalmente los siguientes factores:

##### ***En materiales y productos.***

- ✓ Disponibilidad y surtidos oportunos.
- ✓ Calidad y contribución a la vida útil de las viviendas.
- ✓ Accesibilidad y precios.

##### ***En tecnologías constructivas.***

- ✓ Disponibilidad
- ✓ Existencia de documentos técnico-normalizados

2. El ahorro de costos en detrimento de la calidad de los materiales utilizados y los recubrimientos escasos del acero de refuerzo debido a las pequeñas dimensiones de los elementos (losas, muros, cadenas o cerramientos), atentan contra la durabilidad de las estructuras.

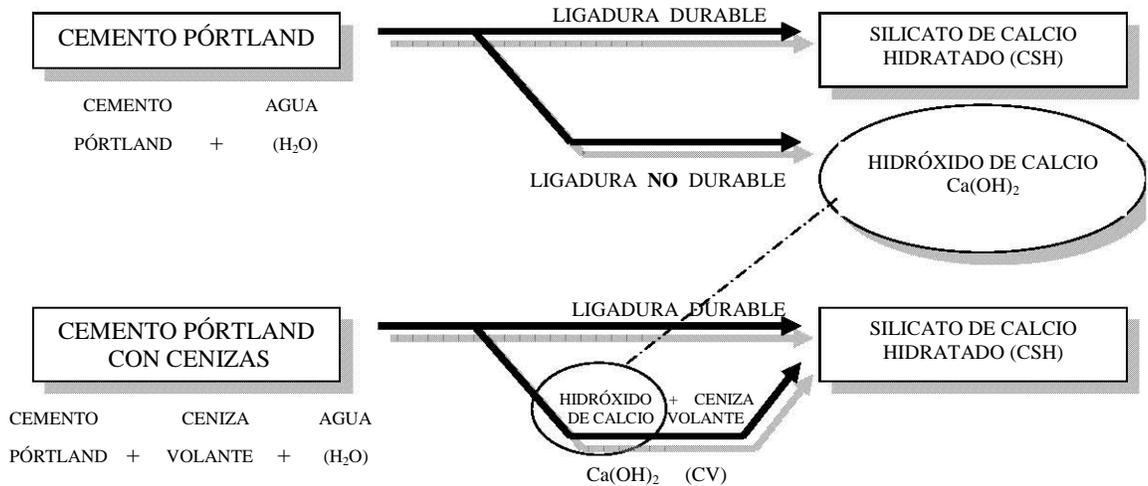
## CAPÍTULO II. “CONCRETOS CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE”

1. Las cenizas volantes cuentan con los mismos componentes químicos que el cemento Pórtland, solo que, en las cenizas volantes son amorfos (debido a un rápido enfriamiento) y en el cemento son cristalinos (debido a un más lento enfriamiento). La diferencia radica en la cantidad relativa de cada uno de sus componentes; el cemento Pórtland es rico en cal y las cenizas volantes no lo son tanto. Por el contrario, las cenizas volantes contienen altas cantidades de silicatos reactivos que en el cemento son pequeñas.

	Parámetro	Cemento	Ceniza
ANÁLISIS QUÍMICO	Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ), %	19.2	62.25
	Óxido de aluminio,(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	5.3	25.70
	Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	3.2	4.68
	Cal combinada (CaO), %	62.9	-
	Cal libre, %	0.3	-
	Magnesio, %	1.2	-
	Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), %	3.1	0.2
	Residuo insoluble, %	0.77	-
	Perdida por calcinación, %	3.0	2.9
	<b>suma</b>	<b>98.97</b>	<b>92.83</b>
	Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O), %	0.32	3.7
	Oxido de potasio,(K <sub>2</sub> O), %	0.47	-
	Total de álcalis (Na <sub>2</sub> O + 0.658 x K <sub>2</sub> O), %	0.63	3.7

2. La pasta (cementante más agua) es clave para un concreto durable y resistente. Completada la hidratación del cemento Pórtland en el concreto, se produce cal no durable en porcentaje del cemento utilizado en la mezcla. Las cenizas volantes reaccionan químicamente con esta cal para crear más silicato de calcio hidratado (CSH) según se observa en el esquema de abajo, disminuyendo la capilaridad del concreto. Como resultado se obtiene un concreto menos permeable.

**LIGADURAS FORMADAS POR LA HIDRATACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES**



Por medio de la actividad puzolánica, las cenizas volantes se combinan con cal libre para producir los mismos compuestos cementantes formados por la hidratación del cemento Pórtland

- Las reacciones químicas son importantes dentro de la composición y comportamiento del concreto, se basan en una variedad de reacciones que van desde el fraguado inicial hasta después del endurecimiento de los constituyentes cementantes. La durabilidad del concreto depende de los procesos químicos que se desarrollan con la combinación de los cementantes, y de éstos con los agregados. El concreto endurecido es químicamente reactivo, por eso, el controlar o compensar adecuadamente la reactividad química es esencial para diseñar mezclas adecuadas de concreto.
- Los concretos con ceniza volante requieren de menores cantidades de cemento, causando una disminución en la producción de éste producto, hecho benéfico dado que el cemento es uno de los principales consumidores de energía, a la vez que es fuente de emisiones de gases que producen el efecto invernadero (GEI).

### CAPÍTULO III. “PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO”

Para el concreto en estado fresco con base en el estudio experimental, analizando los resultados en cuanto a propiedades de los concretos con HVFA y sus comparativos (concretos testigo), utilizados para la construcción de vivienda de interés social; se concluye lo siguiente:

**Tabla comparativa de los concretos con HVFA respecto a los concretos testigo, pruebas en estado fresco.**

Mezcla	Masa volumétrica*		Contenido de aire*		Revenimiento	
	(kg/cm <sup>3</sup> )	Variación (%)	(%)	Variación (%)	(cm)	Variación (%)
M1C200GA M1HVFA200GA	2,167 2125	1.9	2.74 2.75	0.5	15.16 16.89	11.4
M2C250GA M2HVFA250GA	2195 2136	2.7	2.65 2.93	10.6	4.63 5.54	19.7
M3C300GA M3HVFA300GA	2174 2135	1.8	2.70 3.17	17.4	17.97 13.86	22.9

\* Valores promedio entre datos obtenidos y calculados

1. El concreto con HVFA resultó similar al concreto testigo; aunque, es de resaltar que para las mismas relaciones agua/cementante y cantidades muy semejantes de aditivo reductor de agua, el concreto con HVFA denotó tener una mejor plasticidad que el concreto testigo. En general después de 24 horas y dependiendo del cuidado tomado durante la fabricación y desmolde de las probetas, la mejor plasticidad alcanzada por los concretos con HVFA se reflejaba en una superficie más uniforme y lisa, con menos burbujas de aire. Consecuentemente y debido a otras propiedades de las cenizas, se puede corroborar lo siguiente:

- ✓ La forma esférica de las partículas de ceniza volante ayuda a mejorar la trabajabilidad del concreto, permite resaltar las propiedades del concreto fresco a través de una demanda reducida de agua para un revenimiento dado, sin perder trabajabilidad. Por el mismo motivo se puede reducir la cantidad de aditivo para conseguir el mismo revenimiento.
- ✓ El Concreto con HVFA denota una mejor bombeabilidad, una cohesión mejorada, una segregación reducida y un menor sangrado.

#### **CAPÍTULO IV. “CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS FABRICADOS CON CEMENTO PÓRTLAND Y CENIZA VOLANTE”**

1. Para los concretos con HVFA los resultados obtenidos en la prueba a compresión a 90 días, son congruentes con los requerimientos para los concretos empleados en la construcción de vivienda de interés social, con excepción de una reducida resistencia a 28 días. Considerando que durante la fase de construcción la estructura no será sometida a las cargas vivas del diseño real, no se considera necesario alcanzar las resistencias especificadas a 28 días, en consecuencia, los concretos con HVFA cumplen con los niveles de resistencia requeridos. Las expresiones encontradas para estimar el valor de la resistencia a cualquier edad respecto a la de 28 días son:

Para concretos **Testigo**: 
$$f_c = \left( \frac{t}{2.71 + 0.89t} \right) f'_{c_{28 \text{ días}}}$$

Para concretos con **HVFA**: 
$$f_c = \left( \frac{t}{9.63 + 0.51t} \right) f'_{c_{28 \text{ días}}}$$

3. En la prueba de resistencia a tensión indirecta todos los concretos mostraron un buen comportamiento, dando resultados aceptables cercanos al 10% de la resistencia alcanzada en compresión, los concretos con HVFA estuvieron más cercanos al porcentaje esperado que los concretos testigo como se muestra en la tabla:

Mezcla		Edad, días	% de $f'_t$ respecto a $f'_c$
TESTIGO	M1C200GA	28	7.45
	M2C250GA		7.32
	M3C300GA		6.46
	M1C200GA	90	8.86
	M2C250GA		6.74
	M3C300GA		6.91
Con HVFA	M1HVFA200GA	28	10.57
	M2HVFA250GA		8.38
	M3HVFA300GA		9.04
	M1HVFA200GA	90	10.20
	M2HVFA250GA		8.20
	M3HVFA300GA		7.79

Las expresiones encontradas para estimar el valor de la resistencia a tensión relacionándola con la resistencia a compresión son:

Para concretos **Testigo**: 
$$\bar{f}_t = 1.41 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$$

Para concretos con **HVFA**: 
$$\bar{f}_t = 1.23 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2$$

4. En la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson en general se observaron buenos resultados: para el módulo los valores obtenidos son propios de un concreto clase 2 según las N.T.C, mientras que la relación de Poisson estuvo fuera del rango característico dando valores de entre 0.2 – 0.3. Las ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson dada la resistencia a compresión son:

Para concretos **Testigo**:

$$E_c = 9138 \sqrt{f'_c}, \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\mu = 0.006 \sqrt{f'_c} + 0.155$$

$$E_c = 10\,278 \sqrt{f'_c}, \quad \text{kg/cm}^2$$

Para concretos con **HVFA**:

$$\mu = 0.012 \sqrt{f'_c} + 0.071$$

5. La prueba de contracción por secado cumple con la relación que esta prueba tiene con el módulo de elasticidad, pues los concretos testigo con módulo más alto tuvieron menores contracciones por secado, comparados con los concretos con HVFA que presentaron valores de módulo más bajos y contracciones más altas. Para edades posteriores se espera que los valores de contracción por secado para los concretos con HVFA se vean estabilizados. Aunque, no es posible aseverar firmemente (por las características de las mezclas M2), se puede decir que, en todos los concretos entre mayor relación agua/cementante, se obtiene mayor contracción, resultando las siguientes ecuaciones que proporcionan la contracción por secado según la relación agua/cementante.

Para concretos **Testigo**: 
$$\varepsilon_u = ( 135 * [ A / C ] + 735 ) \times 10^{-6}$$

Para concretos con **HVFA**: 
$$\varepsilon_u = ( 283 * [ A / (C + FA) ] + 777 ) \times 10^{-6}$$

6. Una baja relación agua/cementante en la mezcla de concreto no necesariamente es la única medida para aumentar la durabilidad del mismo, otros factores como: baja permeabilidad, fácil consolidación del concreto y excelente resistencia a los ataques de sulfatos son igual de importantes que una baja relación de agua cemento.

7. El concreto con HVFA es menos permeable porque las cenizas volantes a través de sus propiedades puzolánicas crean más Silicato de calcio hidratado (CSH) que llena los poros capilares, que sirven para la filtración del agua y que se encuentran ocupados por la cal libre soluble en agua (hidróxido de calcio).
  
8. Las cenizas volantes aumentan la resistencia al sulfato, reducen efectivamente este deterioro por sulfatos de tres maneras:
  - ✓ Las cenizas volantes se unen a la cal para formar compuestos cementantes que no son susceptibles a la reacción de los sulfatos.
  
  - ✓ La actividad de las cenizas volantes reduce la permeabilidad del concreto, dificultando la penetración de los sulfatos.
  
  - ✓ Reducen la cantidad de aluminatos reactivos necesarios para la reacción con los sulfatos, al sustituir una parte del cemento Pórtland con cenizas volantes.

#### **EN GENERAL:**

A partir de todo lo que se ha expuesto en éste estudio se justifica la utilización de altas cantidades de ceniza volante como sustituto parcial de cemento Pórtland en el diseño y fabricación de concretos. Los concretos con HVFA cumplen con los requerimientos para los concretos empleados en la construcción de vivienda de interés social. Las pruebas efectuadas en el laboratorio corroboran el buen desempeño de los concretos con HVFA, el alza en la resistencia a la permeabilidad refleja una buena durabilidad del concreto lo que a su vez traerá un incremento en la vida útil de la vivienda, todo esto sin incrementar costos por el contrario estos podrían verse disminuidos, incluyendo los costos ambientales ocasionados por dos industrias vitales para el desarrollo económico como son: la industria del cemento y la industria de la producción energética a base de carbón.

---

## V.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Para cubrir con la demanda requerida de vivienda es necesario llevar ésta a una producción en masa; condición que no debe verse reflejada en la calidad de la vivienda, cumpliendo con las normas de construcción, de manera específica las que precisan las características del concreto.
- ✓ La investigación e implementación de nuevas tecnologías en la industria del concreto, sobre todo si estas no incrementan los costos, harán más eficiente al producto terminado (vivienda), sin que se requiera de cuidados excesivos y mantenimientos tempranos que eleven los costos.
- ✓ El uso de aditivos reductores de agua en los concretos para la fabricación de viviendas, mejora el revenimiento dando una mayor manejabilidad al concreto. Sin embargo, la utilización de éste debe hacerse con conocimiento previo del aditivo, ya que tienen reacción temprana y son susceptibles a una rápida pérdida de propiedades.
- ✓ El uso del concreto con grandes cantidades de ceniza volante podrá realzar la calidad de las estructuras y la vida de servicio, a través de la durabilidad y aprovechamiento eficiente de subproductos de otras industrias (carboeléctricas).
- ✓ En cuanto al concreto con HVFA sus características son propias de los concretos convencionales; sin embargo, su fabricación en condiciones reales de obra y según las especificaciones del proyecto requiere de una mayor supervisión desde su fabricación hasta edades tempranas (menores de 56 ó 90 días).

- ✓ Por cuestiones de efectividad y seguridad es recomendable dejar atrás prácticas como la fabricación de concretos en sitio, sugiriendo el uso de productos premezclados. Aun más, productos como los concretos con HVFA son altamente recomendados en la fabricación de elementos prefabricados reduciendo los tiempos de construcción y sin la preocupación de las resistencias y cuidados a edades tempranas.
  
- ✓ Por cuestiones económicas y ambientales, el concreto con HVFA vislumbra un panorama donde su utilización será de forma masiva, por ello es recomendable profundizar en sus características y llevarlo más a la práctica en la industria de la construcción.
  
- ✓ De todo lo anterior se puede aseverar que: La industria de la vivienda, y en general la industria de la construcción, se verán ampliamente beneficiadas con la implementación de las cenizas volantes (FA) un subproducto obtenido de la quema de carbón en las plantas carboeléctricas, barato y ampliamente disponible que puede ser utilizado como sustituto parcial para el cemento. Como se dio a notar con los resultados el concreto con HVFA es una de las tecnologías actuales más recomendada.



*El edificio de informática en la universidad de York, Toronto, Canadá (arriba)*, construido en 2001 da muestra clara de que se puede edificar con concretos con HVFA. En la fabricación de los elementos estructurales se sustituyó el 50% de cemento por ceniza volante clase C, teniendo como cantidad de cementante  $340 \text{ kg/m}^3$  y relaciones agua cemento dentro del rango de 0.38-0.40.

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- ❏ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), “ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, SECTION 4, CONSTRUCTION” ASTM, pp. 911, United States of America, 2005.
- ❏ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), “TESTS AND PROPERTIES OF CONCRETE”, 1a. Edición, pp. 571, United States of America, 1966.
- ❏ COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), “MANUAL DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO”, Secciones I, II, III y IV, Editorial Limusa, pp. 1414, México, 1994.
- ❏ COMISIÓN NACIONAL DE FOMENTO A LA VIVIENDA (CONAFOVI), “CÓDIGO DE EDIFICACIÓN DE VIVIENDA”, 1a. Edición, pp. 70, México, 2005.
- ❏ INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO (IMCYC), “PRÁCTICA PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL, CONCRETO PESADO Y CONCRETO MASIVO”, 2a. Edición, pp. 108, México, 1986.
- ❏ NEVILLE, A.M., BROOKS, J.J., “CONCRETE TECHNOLOGY”, 1a. Edición, Editorial John Wiley & Sons Inc., pp. 438, Irlanda del Norte, 1987.
- ❏ MEHTA, P.K. y MONTEIRO, P., “CONCRETO, ESTRUCTURA, PROPIEDADES Y MATERIALES”, 1a. Edición, IMCYC, pp. 381, México, 1998.
- ❏ MALHOTRA, V.M., and MEHTA, P.K., “HIGH-PERFORMANCE, HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE” Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc., pp. 101, Canadá, 2002.
- ❏ MENDOZA, C.J., CARMONA, C.M., “CONCRETOS FABRICADOS CON ARENAS Y GRAVAS CALIZAS DISPONIBLES EN EL D.F.”, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1995.
- ❏ MENDOZA, C.J., MUÑOZ, J.G., “CONCRETOS DURABLES CON ALTO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE”, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2007.

---

**REFERENCIAS HEMEROGRÁFICAS:**

- ✚ BILODEAU, A. and MALHOTRA, V.M., “CONCRETE INCORPORATING HIGH VOLUMES OF ASTM CLASS F FLY ASH”, Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt Scaling and to Chloride-Ion Penetration, ACI-SP 132, Vol. 1, pp. 319-349, 1992.
- ✚ MEHTA, P.K. “CONCRETE TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT” Concrete International 21(11), pp. 47-52, 1999.
- ✚ MEHTA, P.K., and BURROWS, R.W., “BUILDING DURABLE STRUCTURES IN THE 21ST CENTURY” Concrete International 23(3), pp. 57-63, 2001.

**REFERENCIAS DE INTERNET:**

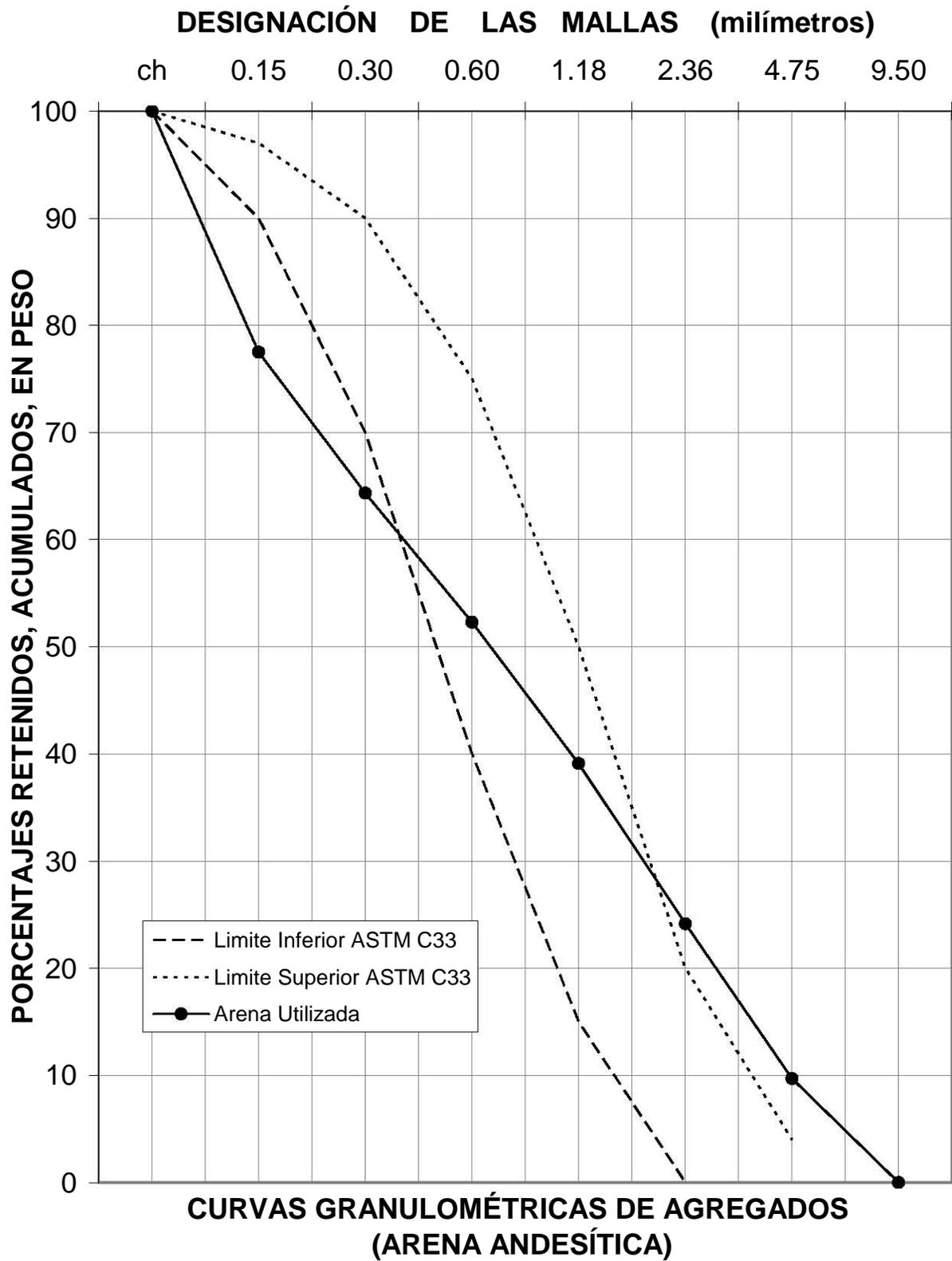
- ✚ CONSEJO NACIONAL DE VIVIENDA: <http://www.conavi.org.mx>.
- ✚ GRUPO SADASI: <http://www.sadasi.com>.
- ✚ FLY ASH: <http://www.flyash.com>.
- ✚ THE CANMET ENERGY TECHNOLOGY CENTRE (CETC): <http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/cetc>.
- ✚ PCA - THE PORTLAND CEMENT ASSOCIATION: <http://www.cement.org>.
- ✚ INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C.: <http://www.imcyc.com>.
- ✚ KYOTO PROTOCOL: <http://www.kyotoprotocol.com>

**TESIS RELACIONADAS:**

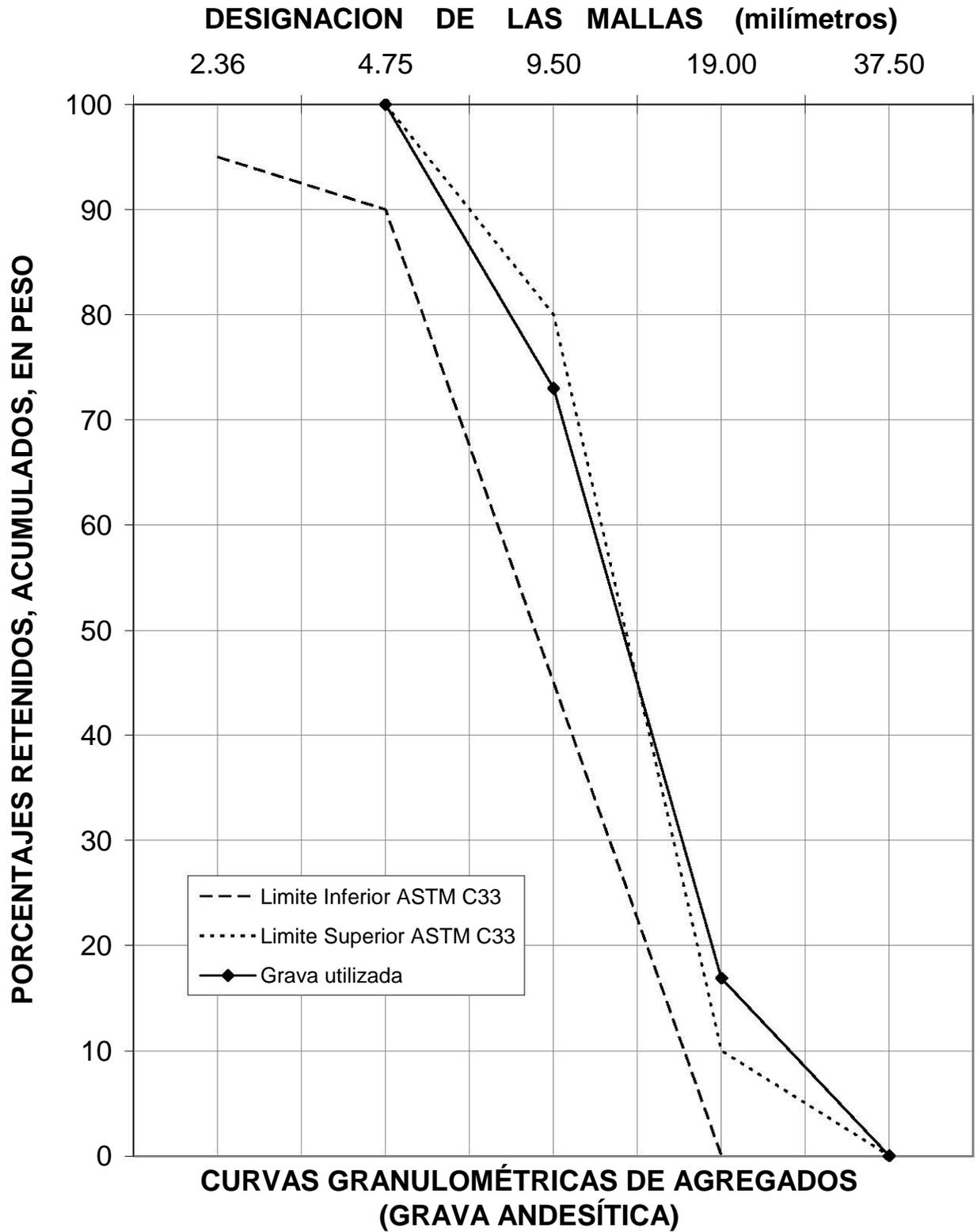
- ✚ MUÑOZ RODRÍGUEZ, José G., “CARACTERIZACIÓN DE CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA EN VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL”, Director: Mendoza E., C.J., UNAM, 2006.
- ✚ ÁLVAREZ REYES, Adrián, “DESEMPEÑO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO PLÁSTICO Y ENDURECIDO”, Director: Mendoza E., C.J., UNAM, 2007.

# Apéndices

GRANULOMETRÍA (AGREGADO FINO)							
<b>Descripción:</b> Arena color gris claro, Andesita							
<b>Procedencia:</b> Mina "la Lupita" banco en planta de concreto grupo SADASI S.A. Héroes de Tecámac Edo. De México							
Arena Andesitica M1							
			Peso total	1045.3			
Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	(LN)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	NORMA C33 (%)
1 1/2"	37.50	3.62		0.00%	0.00%	100.00%	
1"	25.00	3.22		0.00%	0.00%	100.00%	
3/4"	19.00	2.94		0.00%	0.00%	100.00%	
3/8"	9.50	2.25		0.00%	0.00%	100.00%	100.00
# 4	4.75	1.56	101.50	9.70%	9.70%	90.30%	95-100
# 8	2.36	0.86	155.90	14.90%	24.60%	75.40%	80-100
# 16	1.18	0.17	154.30	14.80%	39.40%	60.60%	50-85
# 30	0.59	-0.53	137.20	13.10%	52.50%	47.50%	25-60
# 50	0.30	-1.22	124.50	11.90%	64.40%	35.60%	5-30
# 100	0.15	-1.91	136.70	13.10%	77.50%	22.50%	0-10
< # 100			234.60	22.50%	100.00%	0.00%	
Total			1044.70				
%			0.06%				
Modulo de finura			2.68				
Arena Andesitica M2							
			Peso total	1071.1			
Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	(LN)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	NORMA C33 (%)
1 1/2"	37.50	3.62		0.00%	0.00%	100.00%	
1"	25.00	3.22		0.00%	0.00%	100.00%	
3/4"	19.00	2.94		0.00%	0.00%	100.00%	
3/8"	9.50	2.25		0.00%	0.00%	100.00%	100.00
# 4	4.75	1.56	104.10	9.70%	9.70%	90.30%	95-100
# 8	2.36	0.86	150.10	14.00%	23.70%	76.30%	80-100
# 16	1.18	0.17	162.30	15.10%	38.80%	61.20%	50-85
# 30	0.59	-0.53	142.60	13.30%	52.10%	47.90%	25-60
# 50	0.30	-1.22	130.70	12.20%	64.30%	35.70%	5-30
# 100	0.15	-1.91	141.10	13.20%	77.50%	22.50%	0-10
< # 100			240.60	22.50%	100.00%	0.00%	
Total			1071.50				
%			-0.04%				
Modulo de finura			2.66				
			Mf	2.67			



GRANULOMETRÍA (AGREGADO GRUESO)							
Descripción: Grava color gris. Andesita							
Procedencia: Mina "Moncayo" banco en planta de concreto grupo SADASI S.A. Héroe de Tecamac Edo. De México							
Grava Andesítica M1							
			Peso total	1842.3			
Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	(LN)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	NORMA C33 (%)
1 1/2"	37.50	3.62		0.00%	0.00%	100.00%	
1"	25.00	3.22	23.90	1.30%	1.30%	98.70%	100
3/4"	19.00	2.94	259.90	14.10%	15.40%	84.60%	90-100
3/8"	9.50	2.25	1036.90	56.30%	71.70%	28.30%	20-55
< 3/8"			521.50	28.30%	100.00%	0.00%	0-5
# 4	4.75	1.56		0.00%	100.00%	0.00%	
# 8	2.36	0.86		0.00%	100.00%	0.00%	
# 16	1.18	0.17		0.00%	100.00%	0.00%	
# 30	0.59	-0.53		0.00%	100.00%	0.00%	
# 50	0.30	-1.22		0.00%	100.00%	0.00%	
# 100	0.15	-1.91		0.00%	100.00%	0.00%	
< # 100				0.00%	100.00%	0.00%	
Total			1842.20				
%			0.01%				
Grava Andesítica M2							
			Peso total	2110.5			
Malla (pulgadas)	Malla (milímetros)	(LN)	Peso retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)	NORMA C33 (%)
1 1/2"	37.50	3.62		0.00%	0.00%	100.00%	
1"	25.00	3.22	18.80	0.90%	0.90%	99.10%	100
3/4"	19.00	2.94	322.70	15.30%	16.20%	83.80%	90-100
3/8"	9.50	2.25	1225.70	58.10%	74.30%	25.70%	20-55
< 3/8"			543.10	25.70%	100.00%	0.00%	0-5
# 4	4.75	1.56		0.00%	100.00%	0.00%	
# 8	2.36	0.86		0.00%	100.00%	0.00%	
# 16	1.18	0.17		0.00%	100.00%	0.00%	
# 30	0.59	-0.53		0.00%	100.00%	0.00%	
# 50	0.30	-1.22		0.00%	100.00%	0.00%	
# 100	0.15	-1.91		0.00%	100.00%	0.00%	
< # 100				0.00%	100.00%	0.00%	
Total			2110.30				
%			0.01%				
			TMA	3/4"			



<b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN</b>					
		Grava Andesítica		Arena Andesítica	
	Unid	M1	M2	M1	M2
Peso seco	gr	1,472.30	1,433.20	469.60	468.10
Peso SSS	gr	1,547.10	1,500.10	500.00	500.00
Peso sumergido	gr	892.00	867.00		
Picnómetro con agua	ml			200	200
Picnómetro con arena + agua	ml			411	409
Volumen de agregados	l	0.66	0.63	0.211	0.209
Peso específico de masa seca	-	2.25	2.26	2.23	2.24
Diferencia	%		0.73%		0.63%
Peso específico saturado	-	2.36	2.37	2.37	2.39
Diferencia	%		0.33%		0.96%
Absorción	%	5.08%	4.67%	6.47%	6.81%
		<b>Grava andesítica</b>		<b>Arena andesítica</b>	
		2.25	2.26	2.23	2.24
<b>Peso específico de masa</b>		<b>x</b>	<b>2.26</b>	<b>x</b>	<b>2.23</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>11.55</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>9.98</b>
		<b>CV</b>	<b>0.51</b>	<b>CV</b>	<b>0.45</b>
		5.08	4.67	6.47	6.81
<b>Absorción</b>		<b>x</b>	<b>4.87</b>	<b>x</b>	<b>6.64</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0.29</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>0.24</b>
		<b>CV</b>	<b>5.99</b>	<b>CV</b>	<b>3.63</b>

<b>PESO VOLUMÉTRICO</b>					
		Grava Andesítica		Arena Andesítica	
	Unid	M1	M2	M1	M2
Peso del material suelto + la olla	gr	12,484.00	12,466.00	13,897.00	13,984.00
Peso del material compacto + la olla	gr	13,111.00	13,408.00	15,024.00	14,895.00
Peso de la olla	gr	3,324.00	3,324.00	3,324.00	3,324.00
Volumen de la olla	l	7.07	7.07	7.07	7.07
Peso volumétrico suelto	kg/m <sup>3</sup>	1,295.62	1,293.07	1,495.47	1,507.78
Diferencia	%		0.20%		0.82%
Peso volumétrico compactado	kg/m <sup>3</sup>	1,384.30	1,426.31	1,654.88	1,636.63
Diferencia	%		3.03%		1.11%
		<b>Grava andesítica</b>		<b>Arena andesítica</b>	
		1,295.62	1,293.07	1,495.47	1,507.78
<b>Peso volumétrico suelto</b>		<b>x</b>	<b>1,294.34</b>	<b>x</b>	<b>1,501.63</b>
		<b>σ</b>	<b>1.80</b>	<b>σ</b>	<b>8.70</b>
		<b>CV</b>	<b>0.14</b>	<b>CV</b>	<b>0.58</b>
		1,384.30	1,426.31	1,654.88	1,636.63
<b>Peso volumétrico compacto</b>		<b>x</b>	<b>1,405.30</b>	<b>x</b>	<b>1,645.76</b>
		<b>σ</b>	<b>29.70</b>	<b>σ</b>	<b>12.90</b>
		<b>CV</b>	<b>2.11</b>	<b>CV</b>	<b>0.78</b>

<b>PERDIDA POR LAVADO, PARTÍCULAS QUE PASAN LA MALLA # 200</b>			
		Arena Andesítica	
	Unid	M1	M2
Peso del material seco antes del lavado	gr	1,273.60	1,033.60
Peso del material seco después del lavado	gr	1,045.10	834.90
Perdida por lavado	%	17.94%	19.22%
		<b>Arena andesítica</b>	
		17.94	19.22
<b>Pérdida por lavado</b>		<b>x</b>	<b>18.58*</b>
		<b>σ</b>	<b>0.91</b>
		<b>CV</b>	<b>4.87</b>
<b>Demasiado elevado este porcentaje*</b>			
<b>Quizá convenga hacer el ensayo de Equivalente de Arena ASTM D2419</b>			
<b>Lo anterior para determinar la cantidad de material arcilloso en la mezcla</b>			



Mezcla 3 C300 GA

FECHA 16/11/2006

CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	300

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	3.96%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1039.9	1000.3

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	2.84%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1053.5	1024.4

SOLUCION				
Cemento [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
300	50%	50%	180	2%

w/c
0.6

CALCULO DE VOLUMENES ABSOLUTOS				
Cemento [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	∑ Vol. [m3]	1 - ∑ Vol. [m3]
0.097	0.18	0.02	0.297	0.703

Vol. Arena	Vol. Grava
0.352	0.352

VALORES DE DISEÑO				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
300	786.72	793.76	180	2,060.48

CORRECCION POR HUMEDAD				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
300	817.86	816.31	217.2	2,151.37

VOLUMEN A MEZCLAR 75 L				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
22.50	61.34	61.22	16.29	161.35

NUMERO DE MEZCLAS 3 M				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
67.50	184.02	183.67	48.87	484.06

Revenimiento	17.97	cm
Peso del molde + concreto	17.900	kg
Peso del molde	2.403	kg
Peso del concreto	15.497	kg
Volumen de concreto	0.00706	m3
P.U. concreto	2,195.62	kg/m3
% Aire	2.015%	%

REVENIMIENTO [cm]			
	M1	M2	M3
1	17.1	21	17.3
2	17.6	18.4	17
3	15.4	20.2	17.7
	16.700	19.867	17.333

molde + concreto [kg]		
1	2	3
17.942	17.885	17.872

75 ml de Pozzoloth 322 N por cada 75L de mezcla



Mezcla 3 HVFA300 GA

FECHA 23/01/2007

CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	300

CENIZA V.
P.e.
1.97

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	3.03%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	970.6

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	2.13%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	979.1

SOLUCIÓN					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
150	150	50%	50%	180	2%

w/c	w/(c+fa)
1.2	0.60

CALCULO DE VOLUMENES ABSOLUTOS					
Cemento [m3]	Ceniza V. [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	$\Sigma$ Vol. [m3]	1 - $\Sigma$ Vol. [m3]
0.048	0.076	0.18	0.02	0.324	0.676

Vol. Arena	Vol. Grava
0.338	0.338

VALORES DE DISEÑO					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
150	150	755.43	762.19	180	1,997.62

CORRECCIÓN POR HUMEDAD					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
150	150	778.31	778.46	228.13	2,084.90

VOLUMEN A MEZCLAR					75	L
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
11.25	11.25	58.37	58.38	17.11	156.37	

NUMERO DE MEZCLAS					3	M
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
33.75	33.75	175.12	175.15	51.33	469.10	

Revenimiento	13.86	cm
Peso del molde + concreto	17.570	kg
Peso del molde	2.403	kg
Peso del concreto	15.167	kg
Volumen de concreto	0.00706	m3
P.U. concreto	2,148.91	kg/m3
% Aire	2.979%	%

	REVENIMIENTO [cm]		
	M1	M2	M3
1	12.2	14.8	15.1
2	13.1	13.5	14.9
3	11.7	14.2	15.2
	12.333	14.167	15.067

molde + concreto [kg]		
1	2	3
17.583	17.582	17.545

100 ml de Pozzolith 322 N por cada 75L de mezcla

Mezcla 2 C250 GA

FECHA 25/01/2007



CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	250

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	3.99%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	961.6

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	2.53%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
999.8	975.1

SOLUCION				
Cemento [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
250	50%	50%	160	2%

w/c
0.64

CALCULO DE VOLUMENES ABSOLUTOS				
Cemento [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	Σ Vol. [m3]	1 - Σ Vol. [m3]
0.081	0.16	0.02	0.261	0.739

Vol. Arena	Vol. Grava
0.37	0.37

VALORES DE DISEÑO				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
250	826.95	834.35	160	2,071.30

CORRECCIÓN POR HUMEDAD				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
250	859.97	855.48	201.38	2,166.83

VOLUMEN A MEZCLAR 75 L				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
18.75	64.50	64.16	15.10	162.51

NUMERO DE MEZCLAS 3 M				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
56.25	193.49	192.48	45.31	487.54

Revenimiento		4.63	cm
Peso del molde + concreto		18.096	kg
Peso del molde		2.403	kg
Peso del concreto		15.693	kg
Volumen de concreto		0.00706	m3
P.U. concreto		2,223.48	kg/m3
% Aire		2.548%	%

REVENIMIENTO [cm]			
	M1	M2	M3
1	4.7	5.5	4.5
2	3.6	5.3	4.7
3	3.6	5	4.8
	3.967	5.267	4.667

molde + concreto [kg]		
1	2	3
18.102	18.155	18.032

83 ml de Pozzolih 322 N por cada 75L de mezcla

Mezcla 2 HVFA250 GA

FECHA 30/01/2007



CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	250

CENIZA V.
P.e.
1.97

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	2.09%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	979.5

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	2.09%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	979.5

SOLUCIÓN					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
125	125	50%	50%	160	2%

w/c	w/(c+fa)
1.28	0.64

CALCULO DE VOLUMENES ABSOLUTOS					
Cemento [m3]	Ceniza V. [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	∑ Vol. [m3]	1 - ∑ Vol. [m3]
0.04	0.063	0.16	0.02	0.283	0.717

Vol. Arena	Vol. Grava
0.359	0.359

VALORES DE DISEÑO					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
125	125	802.37	809.55	160	2,021.92

CORRECCIÓN POR HUMEDAD					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
125	125	819.16	826.49	218.97	2,114.62

VOLUMEN A MEZCLAR					75	L
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
9.38	9.38	61.44	61.99	16.42	158.60	

NUMERO DE MEZCLAS					3	M
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
28.13	28.13	184.31	185.96	49.27	475.79	

Revenimiento		5.54	cm
Peso del molde + concreto		17.627	kg
Peso del molde		2.403	kg
Peso del concreto		15.224	kg
Volumen de concreto		0.00706	m3
P.U. concreto		2,156.94	kg/m3
% Aire		1.962%	%

REVENIMIENTO [cm]			
	M1	M2	M3
1	5	6	6.6
2	5	5.3	6.7
3	4.5	4.8	6
	4.833	5.367	6.433

molde + concreto [kg]		
1	2	3
17.66	17.662	17.558

83 ml de Pozzolih 322  
N por cada 75L de  
mezcla



Mezcla 1 C200 GA

FECHA 01/02/2007

CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	200

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	2.92%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	971.6

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	1.17%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1000	988.4

SOLUCIÓN				
Cemento [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
200	50%	50%	165	2%

w/c
0.83

CALCULO DE VOLÚMENES ABSOLUTOS				
Cemento [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	∑ Vol. [m3]	1 - ∑ Vol. [m3]
0.065	0.165	0.02	0.250	0.750

Vol. Arena	Vol. Grava
0.375	0.375

VALORES DE DISEÑO				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
200	838.13	845.63	165	2,048.76

CORRECCION POR HUMEDAD				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
200	862.63	855.55	227.41	2,145.59

VOLUMEN A MEZCLAR 75 L				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
15.00	64.70	64.17	17.06	160.92

NUMERO DE MEZCLAS 3 M				
Cemento [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
45.00	194.09	192.50	51.17	482.76

Revenimiento	15.16	cm
Peso del molde + concreto	17.834	kg
Peso del molde	2.403	kg
Peso del concreto	15.431	kg
Volumen de concreto	0.00706	m3
P.U. concreto	2,186.36	kg/m3
% Aire	1.865%	%

REVENIMIENTO [cm]			
	M1	M2	M3
1	17	16.5	14.2
2	13.5	16.8	14
3	14	17	13.4
	14.833	16.767	13.867

molde + concreto [kg]		
1	2	3
17.837	17.808	17.858

70 ml de Pozzolith 322 N por cada 75L de mezcla

Mezcla 1 HVFA200  
GA

FECHA 07/02/2007



CEMENTO		
Tipo	P.e.	Cantidad [kg]
C. Azul CPO 30R	3.10	200

CEMENTO V.
P.e.
1.97

ARENA				
Tipo	P.e.	% Absorción	C.H. %	M.F.
Andesita	2.23	6.64%	1.46%	2.67

ARENA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1500	1478.4

GRAVA					
Tipo	PVSC [kg/m3]	P.e.	% Absorción	C.H. %	T.M.
Andesita	1,405.00	2.26	4.87%	1.46%	3/4"

GRAVA	
W húmedo (g)	W seco (g)
1400	1379.8

SOLUCIÓN					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena %	Grava %	Agua [kg]	Aire %
100	100	50%	50%	165	2%

w/c	w/(c+fa)
1.65	0.83

CALCULO DE VOLUMENES ABSOLUTOS					
Cemento [m3]	Ceniza V. [m3]	Agua [m3]	Aire [m3]	Σ Vol. [m3]	1 - Σ Vol. [m3]
0.032	0.051	0.165	0.02	0.268	0.732

Vol. Arena	Vol. Grava
0.366	0.366

VALORES DE DISEÑO					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
100	100	818.01	825.33	165	2,008.34

CORRECCIÓN POR HUMEDAD					
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]
100	100	829.96	837.41	235.48	2,102.85

VOLUMEN A MEZCLAR					75	L
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
7.50	7.50	62.25	62.81	17.66	157.71	

NUMERO DE MEZCLAS					3	M
Cemento [kg]	Ceniza V. [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]	Total [kg]	
22.50	22.50	186.74	188.42	52.98	473.14	

Revenimiento	16.89	cm
Peso del molde + concreto	17.555	kg
Peso del molde	2.403	kg
Peso del concreto	15.152	kg
Volumen de concreto	0.00706	m3
P.U. concreto	2,146.83	kg/m3
% Aire	2.049%	%

	REVENIMIENTO [cm]		
	M1	M2	M3
1	18.3	16.5	19.5
2	17	14.7	15.7
3	17.5	16.8	16
	17.600	16.000	17.067

molde + concreto [kg]		
1	2	3
17.597	17.526	17.543

34 ml de Pozzolih  
322 N por cada 75L  
de mezcla

Prueba	Concreto	Edad (días)	Cilindro	f 'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Coefficiente de variación
Resistencia a la compresión simple	M3 C300 GA	7	C7-C1	320.82	322.11	6.95
			C7-C2	300.41		
			C7-C3	345.10		
		14	C14-C1	403.73	392.90	2.69
			C14-C2	392.33		
			C14-C3	382.63		
		28	C28-C1	394.29	399.63	1.19
			C28-C2	401.19		
			C28-C3	403.40		
		90	C90-C1	444.75	460.53	2.98
			C90-C2	469.53		
			C90-C3	467.32		
ASTM C-39/C-39M	M3 HVFA300 GA	7	C7-C1	147.14	141.84	6.14
			C7-C2	131.80		
			C7-C3	146.59		
		14	C14-C1	172.49	176.52	2.22
			C14-C2	180.30		
			C14-C3	176.78		
		28	C28-C1	195.96	196.03	2.46
			C28-C2	200.89		
			C28-C3	191.23		
		90	C90-C1	313.29	322.41	3.50
			C90-C2	335.05		
			C90-C3	318.90		
	M2 C250 GA	7	C7-C1	330.15	320.93	3.86
			C7-C2	325.77		
			C7-C3	306.87		
		14	C14-C1	368.33	379.34	2.79
			C14-C2	389.44		
			C14-C3	380.24		
		28	C28-C1	421.03	421.22	3.47
			C28-C2	435.91		
			C28-C3	406.70		
		90	C90-C1	424.34	457.66	6.55
			C90-C2	466.17		
			C90-C3	482.47		
	M2 HVFA250 GA	7	C7-C1	110.06	113.90	5.58
			C7-C2	121.24		
			C7-C3	110.41		
		14	C14-C1	151.33	151.41	4.44
			C14-C2	158.16		
			C14-C3	144.73		
		28	C28-C1	171.99	173.81	1.81
			C28-C2	177.45		
			C28-C3	171.99		
		90	C90-C1	257.36	268.93	4.64
			C90-C2	282.16		
			C90-C3	267.28		
	M1 C200 GA	7	C7-C1	205.61	213.89	5.30
			C7-C2	209.25		
			C7-C3	226.81		
		14	C14-C1	262.00	265.32	4.40
			C14-C2	255.64		
			C14-C3	278.30		
		28	C28-C1	272.79	276.01	5.33

		90	C28-C2 C28-C3 C90-C1 C90-C2 C90-C3	263.17 292.08 257.36 282.16 267.28	268.93	4.64	
	M1 HVFA200 GA	7	C7-C1 C7-C2 C7-C3	55.66 49.74 55.66	53.69	6.37	
		14	C14-C1 C14-C2 C14-C3	72.74 71.09 70.63	71.49	1.56	
		28	C28-C1 C28-C2 C28-C3	87.62 90.83 89.83	89.43	1.84	
		90	C90-C1 C90-C2 C90-C3	159.27 156.20 158.16	157.88	0.98	
Prueba		Concreto	Edad (días)	Cilindro	f 't b (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Coefficiente de variación
Resistencia a la tensión indirecta  ASTM C-496		M3 C300 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	30.31 24.25 22.95	25.83	15.21
			90	T90-C1 T90-C2 T90-C3	29.22 35.33 30.97	31.84	9.87
		M3 HVFA300 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	17.22 16.16 19.77	17.72	10.46
			90	T90-C1 T90-C2 T90-C3	24.20 27.14 23.98	25.11	7.01
		M2 C250 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	34.44 29.40 28.71	30.85	10.14
	90		T90-C1 T90-C2 T90-C3	30.43 29.21 32.89	30.84	6.08	
	M2 HVFA250 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	14.07 15.04 14.58	14.56	3.31	
		90	T90-C1 T90-C2 T90-C3	20.87 25.73 19.51	22.04	14.83	
	M1 C200 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	22.32 18.48 20.85	20.55	9.43	
		90	T90-C1 T90-C2 T90-C3	25.14 24.87 24.85	24.96	0.65	
	M1 HVFA200 GA	28	T28-C1 T28-C2 T28-C3	9.21 9.09 10.04	9.45	5.43	
		90	T90-C1 T90-C2 T90-C3	15.30 15.17 17.82	16.10	9.27	
	Prueba	Concreto	Edad	Cilindro	E <sub>c</sub>	Promedio	Coefficiente

		(días)		(kg/cm <sup>2</sup> )		de variación
Módulo de elasticidad  ASTM C-469	M3 C300 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	170312.99 179789.44 176751.30	175,617.91	2.76
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	193525.45 200695.37 193457.55		
	M3 HVFA300 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	143909.34 141444.30 139437.10	141,596.91	1.58
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	165749.48 170756.61 174582.45		
	M2 C250 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	170543.84 178163.17 171801.13	173,502.71	2.35
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	195601.39 202345.61 208801.26		
	M2 HVFA250 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	132540.56 136648.30 133800.47	134,329.78	1.57
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	167343.09 165073.51 158233.17		
	M1 C200 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	150106.67 147264.18 148260.80	148,543.88	0.97
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	183733.82 175789.09 173562.64		
	M1 HVFA200 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	100994.28 110871.38 99829.89	103,898.52	5.84
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	143930.30 140391.26 141443.42		
Prueba	Concreto	Edad (días)	Cilindro	μ	Promedio	Coefficiente de variación
Relación de Poisson  ASTM C-469	M3 C300 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	0.28 0.29 0.31	0.29	4.05
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	- 0.31 0.29		
	M3 HVFA300 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	0.29 0.23 0.22	0.25	3.46
		90	M90-C1 M90-C2 M90-C3	0.26 0.27 0.26		
M2 C250 GA	28	M28-C1 M28-C2 M28-C3	0.26 0.27 0.27	0.27	2.20	
	90	M90-C1	0.27			0.28

			M90-C2	0.28		
			M90-C3	0.30		
	M2 HVFA250 GA	28	M28-C1	0.23	0.22	5.14
			M28-C2	0.21		
			M28-C3	0.21		
		90	M90-C1	0.28	0.28	5.03
			M90-C2	0.29		
			M90-C3	0.26		
	M1 C200 GA	28	M28-C1	0.25	0.25	1.25
			M28-C2	0.24		
			M28-C3	0.24		
		90	M90-C1	0.29	0.28	3.24
			M90-C2	0.28		
			M90-C3	0.27		
	M1 HVFA200 GA	28	M28-C1	0.19	0.17	6.03
			M28-C2	0.16		
			M28-C3	0.15		
		90	M90-C1	0.23	0.23	4.83
			M90-C2	0.24		
			M90-C3	0.22		

**ASTM-C-1202**

“Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”  
(Método de Ensayo Estándar para la Indicación Eléctrica de la Capacidad del Concreto para Resistir la Penetración del Ion Cloruro)



<b>M3C300GA</b>	28 días (15/12/2006)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	5434	5710	4892	6048	-	5137	5444
		Coulombs ajustados	4904	5153	4415	5458	-	4636	<b>4913</b>
		Permeabilidad	Alto	Alto	Alto	Alto	-	Alto	<b>Alto</b>
	90 días (15/02/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	3987	3582	3551	-	3243	3316	3536
		Coulombs ajustados	3598	3233	3205	-	2927	2993	<b>3191</b>
		Permeabilidad	Moderado	Moderado	Moderado	-	Moderado	Moderado	<b>Moderado</b>
<b>M3HVFA300GA</b>	28 días (20/02/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	7346	8103	-	7502	-	7358	7577
		Coulombs ajustados	6630	7313	-	6771	-	6641	<b>6839</b>
		Permeabilidad	Alto	Alto	-	Alto	-	Alto	<b>Alto</b>
	90 días (24/04/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	852	930	-	988	780	-	888
		Coulombs ajustados	769	839	-	892	704	-	<b>801</b>
		Permeabilidad	Muy bajo	Muy bajo	-	Muy bajo	Muy bajo	-	<b>Muy bajo</b>
<b>M2C250GA</b>	28 días (22/02/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	4847	4843	4573	4557	4813	-	4727
		Coulombs ajustados	4374	4371	4127	4113	4344	-	<b>4266</b>
		Permeabilidad	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	-	<b>Alto</b>
	90 días (26/04/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	2546	2913	-	2785	2253	-	2624
		Coulombs ajustados	2298	2629	-	2513	2033	-	<b>2368</b>
		Permeabilidad	Moderado	Moderado	-	Moderado	Moderado	-	<b>Moderado</b>
<b>M2HVFA250GA</b>	28 días (27/02/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	7956	7195	-	7179	6769	5953	7010
		Coulombs ajustados	7180	6493	-	6479	6109	5373	<b>6327</b>
		Permeabilidad	Alto	Alto	-	Alto	Alto	Alto	<b>Alto</b>
	90 días (01/05/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	632	654	-	780	697	742	701
		Coulombs ajustados	570	590	-	704	629	670	<b>633</b>
		Permeabilidad	Muy bajo	Muy bajo	-	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	<b>Muy bajo</b>
<b>M1C200GA</b>	28 días (01/03/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	5808	5638	-	7299	5995	6941	6336
		Coulombs ajustados	5242	5088	-	6587	5410	6264	<b>5718</b>
		Permeabilidad	Alto	Alto	-	Alto	Alto	Alto	<b>Alto</b>
	05/04/2007	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	2997	3423	-	3887	3090	3605	3400
		Coulombs ajustados	2705	3089	-	3508	2789	3254	<b>3069</b>
		Permeabilidad	Moderado	Moderado	-	Moderado	Moderado	Moderado	<b>Moderado</b>
<b>M1HVFA200GA</b>	28 días (07/03/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	-	7434	-	7979	-	5307	6907
		Coulombs ajustados	-	6709	-	7201	-	4790	<b>6233</b>
		Permeabilidad	-	Alto	-	Alto	-	Alto	<b>Alto</b>
	90 días (09/05/2007)	Canal	1	2	3	4	5	6	Promedio
		Coulombs	1010	995	-	1609	1205	1499	1264
		Coulombs ajustados	912	898	-	1452	1088	1353	<b>1141</b>
		Permeabilidad	Muy bajo	Muy bajo	-	Bajo	Bajo	Bajo	<b>Bajo</b>