



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO CON  
ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCION

P R E S E N T A :

**ERIC VÁSQUEZ PANIAGUA**

TUTOR:

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I. FERNANDO FAVELA LOZOYA  
Secretario: DR. JESUS HUGO MEZA PUESTO  
Vocal: M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO  
1<sup>er</sup>. Suplente: ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES  
2<sup>do</sup>. Suplente: ING. ALEJANDRO VAZQUEZ VERA

Lugar donde se realizó la tesis:  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

A la memoria de Claudia Mónica Hinojosa,  
quien empezó este trabajo.

Como siempre, a mi familia, porque todo lo que hago y lo poco que pueda lograr es por y para ellos, por haberme hecho sentir que nunca nos alejamos y por seguir conmigo en mi lucha; a José y Nancy mis padres, a gigi y nano, mis hermanos, y a los nuevos integrantes Camilita y Mijaelito, mis sobrinos.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A mi tutor M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por su apoyo y confianza para desarrollar este proyecto.

A la UNAM por dejarme ser parte de ella.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por otorgarme la beca y permitirme conocer grandes amigos, y a su personal técnico por el apoyo en el desarrollo de los ensayos.

A mi familia por estar siempre conmigo a pesar de la distancia, a mi tío Humberto y a mi tía Gladis por ser como otros dos padres para mi, a mis sobrinos Camilita y Mijaelito porque con sus sonrisas y travesuras me enseñan que la vida sigue siendo simple.

A mis amigos, a los de Lima porque siguen ahí desde hace tiempo, a los que conocí en México porque gracias a ellos mi aprendizaje no fue sólo académico. A los de la “comunidad del antrillo”, Miguel, Giulio, Alina, Laura, Ivonne, Rober, Jako, por ser como mi familia en México. A los del Instituto, Luciano, “el morro”, Giovanni, Cesar, “la Juli”, Tony, por los momentos compartidos, las celebraciones, el fútbol, los viajes.

A todos gracias.....totales.

## INDICE.

INTRODUCCIÓN.	iii
Hipótesis.	iv
Objetivo.	iv
Alcances.	v
1. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE.	1
1.1. Breve reseña de los concretos con elevado consumo de ceniza volante.	1
1.2. Mejoras en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con elevado consumo de ceniza volante.	3
2. LA CENIZA VOLANTE.	5
2.1. Composición química.	7
2.2. Composición mineralógica.	7
2.3. Características de las partículas.	8
3. DISEÑOS DE MEZCLA.	10
3.1. Materiales utilizados.	10
3.1.1. Agregados pétreos.	10
3.1.2. Ceniza volante.	14
3.1.3. Cemento.	16
3.1.4. Aditivos.	17
3.2. Consideraciones generales de los diseños de mezclas.	17
3.3. Variación del porcentaje de reemplazo de ceniza volante.	21
4. PROPIEDADES DEL CONCRETO.	26
4.1. Concreto en estado fresco.	26
4.1.1. Trabajabilidad.	27
4.1.2. Contenido de aire y peso volumétrico.	28

4.2. Concreto en estado endurecido.	29
4.2.1. Resistencia a la compresión.	31
4.2.2. Resistencia a la tensión indirecta por compresión diametral.	32
4.2.3. Módulo de elasticidad.	35
4.2.4. Contracción por secado.	37
4.2.5. Deformación diferida.	41
4.2.6. Resistencia del concreto a la permeabilidad de los cloruros.	44
4.2.7. Resistencia al ataque de sulfatos.	47
5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	50
5.1. Trabajabilidad.	50
5.2. Resistencia a compresión.	51
5.3. Relación $a/(c+cv)$ – resistencia a compresión.	64
5.4. Resistencia a la tensión indirecta.	66
5.5. Módulo de elasticidad y relación de Poisson.	72
5.6. Contracción por secado.	84
5.7. Deformación diferida.	89
5.8. Resistencia del concreto a la permeabilidad de los cloruros.	91
5.9. Resistencia al ataque de sulfatos.	97
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	103
REFERENCIAS.	108
ANEXOS.	I

## **RESUMEN.**

En el presente trabajo se investiga el comportamiento de concretos en los que el cementante está integrado por cemento pórtland y ceniza volante procedente de la carboeléctrica de Río Escondido, Coahuila. El estudio se realiza mediante la comparación de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, se comparan mezclas de control, en donde el cementante utilizado es únicamente cemento pórtland; y mezclas de concreto en donde se utilizan cemento pórtland y ceniza volante como cementante.

Para la elaboración de las mezclas se utilizan agregados disponibles en la ciudad de México. Se emplean dos tipos distintos de agregado grueso, andesítico y calizo; un tipo de agregado fino, arena andesítica; un tipo de cemento, CPO 30R; un tipo de ceniza, clase F, dos tipos de aditivos, fluidificante y súper fluidificante.

En el diseño de las mezclas se considera el tener mezclas comparables en donde la única variación entre las mezclas de control y las de ceniza volante sea el reemplazo del 50% del cemento pórtland por ceniza volante. Se consideran siete consumos de cementante y un porcentaje de reemplazo de 50%.

En el concreto en estado fresco se comparan la trabajabilidad, el peso volumétrico y el contenido de aire. En el estado endurecido se comparan las propiedades mecánicas como la resistencia a compresión, la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, el flujo plástico y la contracción por secado; y propiedades de durabilidad como la permeabilidad a los cloruros, y la resistencia al ataque de sulfatos.



## INTRODUCCIÓN.

El concreto es el material que ha tenido mayor uso en la construcción de edificios e infraestructura en la historia de la civilización, es por esto que la industria de la construcción se ha preocupado en buscar la forma de producir concretos con mejores desempeños, tanto técnicos como económicos, y en los últimos tiempos, ecológicos. Esto ha hecho que se mire a la búsqueda de materiales cementantes alternativos al cemento pórtland que aporten nuevas cualidades al concreto a la vez que contribuyan al ahorro energético y a la disminución de la emisión de contaminantes, propias de la producción del cemento pórtland.

EL proceso de producción del cemento pórtland es el que tiene mayor demanda de energía después de la que requiere la producción del aluminio y del acero; se necesitan 4GJ para la producción de una tonelada de cemento pórtland. Es también un proceso con alta emisión de contaminantes, una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento, considerando que la producción anual de cemento es de más de 1,600 millones de toneladas con la respectiva emisión de CO<sub>2</sub> y la emisión total de CO<sub>2</sub> es de 23,000 millones de toneladas al año, la producción de cemento contribuye con el 7% de la emisión total de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Uno de los materiales que se ha estudiado como un cementante complementario del cemento pórtland es la ceniza volante, un subproducto de la combustión del carbón en las centrales carboeléctricas, que tradicionalmente se ha considerado como desperdicio, por lo que se han incurrido en los correspondientes gastos para su eliminación. Este material de desperdicio se debe eliminar en vertederos, siendo transportado y almacenado muchas veces por métodos húmedos, que requieren la adición de agua. Es así que se han formado rellenos de cientos de miles de toneladas, los que se han debido restaurar y acondicionar para evitar el peligro de contaminación de zonas aledañas. La producción anual mundial de ceniza de carbón se calcula en más de 700 millones de toneladas, de las cuales al menos el 70% ó 500 millones de toneladas son cenizas volantes.

Los estudios realizados han demostrado que la inclusión de la ceniza volante mejora la durabilidad de las mezclas de concreto debido a las características de sus partículas, y que con un adecuado diseño de mezclas y proporción de reemplazo de cemento pórtland por ceniza volante se pueden llegar a tener resistencias mecánicas comparables a las de un concreto convencional con sólo cemento pórtland como cementante. Se han hecho estudios con reemplazos de ceniza volante de hasta el 60% del material cementante.

El reemplazar parte del cemento por ceniza volante en las mezclas de concreto conlleva un beneficio económico, por ser la ceniza volante un material más barato que el cemento y también porque se disminuyen los gastos de eliminación de la ceniza volante para las empresas productoras de energía.

### **Hipótesis.**

La inclusión de ceniza volante en el concreto como reemplazo parcial del cemento pórtland mejora la trabajabilidad de las mezclas y la durabilidad del concreto.

Las mezclas de concreto con ceniza volante tendrán resistencias mecánicas menores a edades tempranas en comparación con las mezclas convencionales de concreto; a edades tardías estas diferencias disminuirán, llegando incluso a igualar o superar las resistencias de las mezclas convencionales de concreto.

La inclusión de ceniza volante en las mezclas de concreto disminuir  la permeabilidad, con lo que se tendrán concretos más durables.

### **Objetivo.**

En estudios realizados en concretos con alto contenido de ceniza volante (Malhotra y Mheta, 2002) se da por sentado la habilidad de la ceniza volante para mejorar la trabajabilidad de las mezclas y por lo tanto actuar como un reductor de agua, esto debido a la morfología de sus partículas, y se parte de esto para hacer los diseños de mezclas, reduciendo el consumo de agua de las mezclas con ceniza volante hasta en un 20% en comparación con los requeridos en los concretos convencionales de cemento pórtland, se recomienda llegar al revenimiento requerido con el uso de un aditivo súper plastificante si es necesario.

Esta disminución de la relación agua / cementantes hace que se mejoren las propiedades del concreto, aumente las resistencias mecánicas como la resistencia a compresión, tensión, etc., y disminuye la permeabilidad mejorando su desempeño de durabilidad. Esto hace que no se pueda distinguir si las mejoras que se puedan encontrar en las propiedades del concreto con ceniza volante se deban a la ceniza volante o a esta reducción de la relación agua / cementantes, o en que porcentaje contribuye cada uno de estos factores.

El requerimiento de agua de las mezclas varía con la graduación de los agregados pétreos, es decir que depende de los agregados con que se cuenten. Por eso es necesario verificar si la ceniza volante disponible tiene la misma habilidad de mejorar la trabajabilidad de las mezclas cuando se utilizan los agregados disponibles en la ciudad de México.

Por lo expuesto, el objetivo principal del presente trabajo es medir y comparar el desempeño de la ceniza volante disponible como material cementante complementario en concretos, fabricados con los materiales locales disponibles: la ceniza volante proveniente de la carboeléctrica de Río Escondido, Coahuila, y los materiales pétreos disponibles en la ciudad de México, y en donde los cambios de las propiedades a medir sean atribuibles a la inclusión de la ceniza volante como reemplazo parcial del cemento pórtland.

### **Alcances.**

La finalidad del trabajo es presentar los resultados de los ensayos experimentales desarrollados en el laboratorio, comparando los resultados obtenidos en los concretos de cemento pórtland, mezclas de control, con los concretos con alto contenido de ceniza volante.

Con este trabajo de investigación se contribuye a la caracterización de los concretos con ceniza volante en la ciudad de México. Pero hay que tener cuidado al tratar de generalizar estos resultados para otros concretos con ceniza volante, ya que los resultados obtenidos son validos para los materiales utilizados: ceniza volante, agregados pétreos, tipo de cemento; y las características de los diseños de mezcla: proporción de reemplazo de ceniza volante, relación arena / grava, características de los agregados.

# **1. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE.**

## **1.1. Breve reseña de los concretos con elevado consumo de ceniza volante.**

Tradicionalmente las cenizas volantes se han considerado como un subproducto o material de desperdicio de las centrales termoeléctricas en el proceso de quemado del carbón para la generación de energía eléctrica. Las cenizas como tal eran llevadas a vertederos en las cercanías de las centrales termoeléctricas, teniendo que hacerse el transporte y apilado con adición de agua debido a la finura y carácter polvoriento de este material, incluso en zonas donde ésta escasea. Así se han formado depósitos de cientos de miles de toneladas que se han tenido que restaurar y acondicionar para evitar el peligro de arrastre y contaminación de zonas colindantes.

Es la industria cementera la que dentro de su búsqueda de materiales alternativos que aporten nuevas cualidades a los cementos a la vez de ahorros energéticos estudian las cenizas volantes. Las investigaciones que se llevaron a cabo detectaron en este producto un poder puzolánico similar a los materiales naturales de origen volcánico que, adicionados al cemento, son capaces de reaccionar con los productos de hidratación aportando nuevas propiedades al concreto.

Durante las etapas iniciales sólo se prestaba atención a la actividad puzolánica de la ceniza volante. Con la profundización del conocimiento de las propiedades de la ceniza volante se encontró que sus partículas tienen una morfología que las diferencia de otros materiales puzolánicos. Esta es la única partícula con la morfología que la hace apta para tener la habilidad de un reductor de agua que otros materiales puzolánicos no tienen. Esto influye no solo en las propiedades reológicas del mortero fresco si no también en la estructura inicial de la pasta de cemento endurecida.

A finales de los 70's Jan de Zeeuw y Abersch proponen que el rol de la ceniza volante, cuyas partículas son menores a 30  $\mu\text{m}$ , debe ser similar a las de las micro partículas de cemento no hidratado.

En 1981 Danshen y Yinji resumen los resultados de investigaciones previas y proponen la hipótesis de los "Efectos de la ceniza volante", ellos consideraron que la ceniza volante tiene tres efectos en el concreto: el morfológico, el activo y el efecto de micro agregado. Los tres efectos están relacionados y es el efecto morfológico el

aspecto más importante de los efectos de la ceniza volante (Aiqin Wang, Chengzhi Zhang, Wei Sun; 2001).

El concreto con alto contenido de ceniza volante fue desarrollado por CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) en los 80's. En este concreto de alto desempeño se reemplazó del 55% al 60% del cemento pórtland por ceniza volante clase F, se usaron relaciones agua / cementantes del orden de  $0.3 \pm 0.02$ , con contenidos de cemento pórtland y ceniza volante de alrededor de 150 a  $225 \text{ kg/m}^3$ , los consumos de agua se mantuvieron alrededor de  $120 \text{ kg/m}^3$  y se lograron trabajabilidades aceptables con dosificaciones altas de súper plastificantes, generalmente de 3 a  $6 \text{ l/m}^3$ . Este tipo de concreto tuvo excelente desempeño de durabilidad a largo plazo y propiedades mecánicas favorables (N. Bouzoubaa, B. Fournier; 2002).

A continuación se listan algunas obras en las que se utilizó el concreto con alto consumo de ceniza volante en Canadá:

- Bloque de concreto para la prueba de componentes para los satélites de comunicación, Ottawa, Canadá 1987: Fue la primera aplicación de campo del concreto con alto contenido de ceniza volante. Se construyó un bloque de concreto de  $9 \times 7 \times 3 \text{ m}$  en el Centro de Investigación de Comunicación. El diseño estructural requería que el bloque tuviera la menor cantidad de micro fisuras posibles,  $400 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia a la compresión y un módulo de elasticidad a 90 días como mínimo de  $300,000 \text{ kg/cm}^2$ . Para esto se usó una mezcla con  $151 \text{ kg/m}^3$  de cemento pórtland tipo II,  $193 \text{ kg/m}^3$  de ceniza volante clase F,  $125 \text{ kg/m}^3$  de agua,  $5.6 \text{ kg/m}^3$  de súper plastificante. Después de 15 años el bloque tiene un comportamiento satisfactorio y el concreto con alto consumo de ceniza volante con las mismas proporciones ha sido usado en un bloque similar en Europa.
- Hotel Park Lane y complejo de oficinas, Halifax, Canadá 1988: Este desarrollo cubre  $0.81 \text{ Ha}$  y tiene  $26,000 \text{ m}^3$  de concreto. El complejo provee  $10,780 \text{ m}^2$  de oficinas en un edificio de 7 niveles, además de 600 estacionamientos interiores. Las columnas y vigas requerían de un concreto de  $500 \text{ kg/cm}^2$  a 120 días. Se usó una proporción de concreto con  $180 \text{ kg/m}^3$  de cemento pórtland tipo I,  $220 \text{ kg/m}^3$  de ceniza volante clase F,  $110 \text{ kg/m}^3$  de agua,  $6 \text{ l/m}^3$  de súper plastificante. No hubieron problemas inesperados con el concreto, y la mezcla

probó ser económica para los 500 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a compresión a los 120 días.

- Concreto lanzado con fibras de polipropileno y alto consumo de ceniza volante, Nova Scotia, Canadá 1992: Se utilizó concreto reforzado con fibras de polipropileno y alto consumo de ceniza volante para estabilizar taludes naturales de una autopista en Nova Scotia, Canadá. El contenido total de material cementicio se mantuvo en 400 kg/m<sup>3</sup>, 60% del cual fue ceniza volante. Se incorporaron fibras de polipropileno de 25 mm. de longitud en una proporción de 4 a 5 kg/m<sup>3</sup> junto con altas dosificaciones de un súper plastificante. El contenido de aire se mantuvo alrededor del 6%. No se tienen datos a largo plazo del desempeño de este concreto, sin embargo un concreto lanzado similar se utilizó para cubrir varios cientos de metros cuadrados de un terraplén de roca pizarra en el aeropuerto internacional de Halifax. El lugar esta expuesto a unos 100 ciclos de congelamiento y deshielo por año, y las secciones experimentales muestran un desempeño satisfactorio luego de 10 años.

## **1.2. Mejoras en las propiedades mecánicas del concreto con elevado consumo de ceniza volante.**

La característica más importante de la ceniza volante por la cual mejora las propiedades mecánicas del concreto es la morfología de su partícula. Esto se refiere a su granulometría, tamaño y distribución, y a la forma y textura de sus partículas. Estas características se reflejan en el efecto de “filler”, lubricante y de distribuir mejor los materiales en la mezcla de concreto. Estos efectos conllevan a que se pueda reducir el consumo de agua en las mezclas de concreto con ceniza volante.

Al ser la ceniza un material que reacciona a edades tardías, o que exhibe sus propiedades puzolánicas a edades tardías, se necesitan reducir las relaciones agua / cementantes en las mezclas de concreto con ceniza volante para obtener resistencias comparables a edades tempranas con las de un concreto de cemento pórtland. Esto se puede lograr gracias a las características de la ceniza de mejorar la trabajabilidad de las mezclas de concreto, con lo que se puede reducir el consumo de agua para un mismo grado de trabajabilidad.

Esta característica de relaciones agua/cementantes bajas le da estándares de concreto de alto desempeño. Las bajas relaciones agua/cementantes además de las características de la morfología de las partículas de ceniza volante disminuyen la permeabilidad de los concretos con ceniza volante, la que está muy ligada a la durabilidad, ya que evita o dificulta en mayor grado el ingreso de cualquier sustancia perjudicial para el concreto. El calor de hidratación también se disminuye notablemente al tener menores consumos de cemento por m<sup>3</sup> de mezcla, lo que lo hace adecuado para concretos masivos o para aquellos donde el calor generado puede causar algún problema de fisuración como los concretos en climas calidos.

En general la mayoría de los problemas asociados al concreto son causados por la naturaleza del cemento pórtland y su reacción con las sustancias del entorno, por lo que los concretos con ceniza volante al disminuir los consumos de cemento pórtland, tendrán un mejor desempeño ante estos problemas.





Básicamente son cuatro los tipos de carbón que se utilizan en las centrales termoeléctricas: antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito, en los que varía principalmente el poder calorífico y la cantidad de carbón fijo presente. El tipo de carbón utilizado influenciará en el tipo de ceniza volante que se obtenga.

Debido a la mejora de la eficiencia del quemado, el carbón es triturado en partículas más finas, con un 75% que pasan la malla #200 (75  $\mu\text{m}$ ).

Los componentes orgánicos son oxidados y volatilizadas durante la combustión y las partículas de cenizas se funden en la zona de combustión del horno, sin embargo una vez que dejan esta zona se enfrían muy rápido, pudiendo pasar de 1500 °C a 200 °C en unos pocos segundos, y solidifican como partículas esféricas vidriosas. Alguna de esta materia fundida se aglomera y debido a su tamaño no puede ser arrastrada por el flujo gaseoso y cae depositada en el fondo de la cámara de combustión formando la escoria. Pero la mayoría es arrastrada por el flujo gaseoso y es llamada ceniza volante.

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 (ciclones), depuradores por vía húmeda y precipitadores electrostáticos. Las cenizas volantes se recogen en las tolvas de los precipitadores electrostáticos, desde donde son transportadas a lugares de almacenamiento, situadas frecuentemente en balsas de decantación o en seco.

La norma ASTM-C-618-03 divide en tres los tipos de ceniza volante:

- Clase N: Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horsteno opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o sin calcinar; y materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.
- Clase F: Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.
- Clase C: Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante además de tener propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias.

## 2.1. Composición química.

Aparentemente existen diferencias considerables en la composición química de la ceniza volante, sin embargo, la diferencia en la composición química por si misma no es tan importante como las diferencias en la composición mineralógica y la granulometría (tamaño y forma de la partícula) para determinar la influencia de la ceniza volante en las propiedades del concreto.

La norma ASTM-C-618-03 dice que la composición química debe estar acorde con los requerimientos de la tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Requerimientos químicos.

	Clase		
	N	F	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 %	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), max %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, max %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por calcinación, max %	10.0	6.0	6.0

El uso de puzolana de clase F conteniendo más de 12% de pérdida por calcinación puede ser aprobada por el usuario si se cuentan con registros de desempeño o resultados de ensayos aceptables.

## 2.2. Composición mineralógica.

La actividad puzolánica de la ceniza volante está altamente influenciada por la cantidad y composición de la fase vidriosa presente.

Las cenizas volantes bajas en calcio, producto de la calcinación del carbón bituminoso, contienen vidrio de aluminosilicato que parece ser un poco menos reactivo que el vidrio de calcio aluminosilicato, presente en las cenizas volantes altas en calcio. Los cristales de minerales que se encuentran típicamente en las cenizas volantes bajas en calcio son el cuarzo, mullita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), sillimanita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>), hematita y magnetita. Estos minerales no poseen ninguna propiedad puzolánica. Los cristales de minerales típicamente encontrados en las cenizas volantes altas en calcio son el cuarzo, aluminato tricálcico (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sulfoaluminato de calcio (4CaO.

3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SO<sub>3</sub>), anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), óxido de calcio libre (CaO), óxido de magnesio libre (MgO) y sulfatos de álcali. A excepción del cuarzo y del óxido de magnesio, todos los cristales de minerales presentes en las cenizas volantes altas en calcio son reactivos. Esto explica porque en comparación con las cenizas volantes bajas en calcio, las cenizas volantes altas en calcio son más reactivas.

### 2.3. Características de las partículas.

En general el mecanismo por el cual las cenizas volantes influyen en las propiedades del concreto fresco y endurecido, depende más del tamaño, forma y textura de las partículas que de la composición química. La demanda de agua y trabajabilidad están controladas por la distribución del tamaño de partículas, por el efecto de empaquetamiento de las partículas y la suavidad de la superficie. Las propiedades puzolánicas y cementicias, que gobiernan el desarrollo de esfuerzos y permeabilidad de las mezclas, están controladas ambas por las características mineralógicas y el tamaño de partícula de la ceniza volante.

Generalmente la actividad puzolánica de la ceniza volante es proporcional a la cantidad de partículas menores a 10 µm, donde las partículas mayores a 45 µm tienen muy poca o casi nula actividad puzolánica. Como referencia se indica que las cenizas volantes de Norte América generalmente contienen 40 a 50% de partículas menores a 10 µm, y menos de 20% de partículas mayores a 45 µm, con un tamaño promedio aproximado de 20 µm.

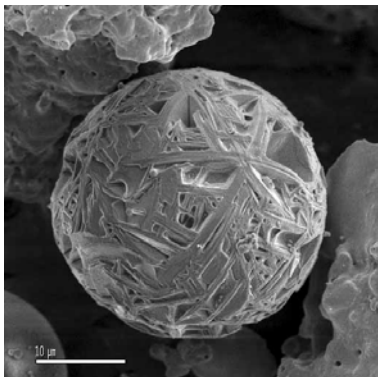


Fig. 1.2 Partícula de ceniza volante.  
de apariencia cristalina

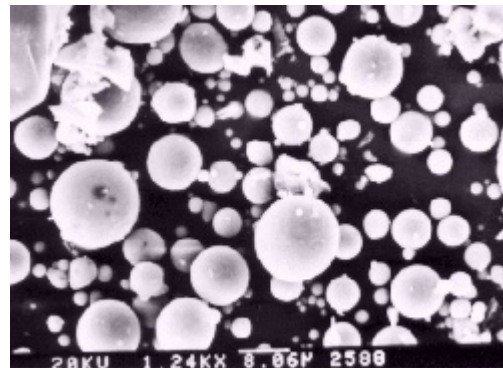


Fig. 1.3 Partículas de ceniza volante.

Las partículas de ceniza volante son de forma esférica, y eso tiene un efecto positivo en el requerimiento de agua y la trabajabilidad de las mezclas de concreto, algunas de las partículas esféricas de la ceniza volante son huecas y completamente vacías (llamadas cenoesferas) o llenas con una esfera de menor diámetro (llamadas pleuroesferas).

La norma ASTM-C-618-03 exige algunas características físicas que debe cumplir los diferentes tipos de ceniza volante, los que son descritos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Requerimientos físicos

	Clase		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida en el tamizado vía húmeda en la malla de 45 $\mu\text{m}$ (N° 325), máx., %A	34	34	34
Índice de actividad puzolánica:B Con cemento portland, a 7 días, mín., %	75	75	75
Con cemento portland, a 28 días, mín., %	75	75	75
Demanda de agua, máx., % del control	115	105	105
Estabilidad:D Expansión, contracción en autoclave, máx, %	0.8	0.8	0.8
Requisitos de uniformidad: Densidad, máxima variación del promedio, %	5	5	5
Porcentaje retenido en 45 $\mu\text{m}$ (N° 325), variación máx., puntos de % del promedio	5	5	5

### 3. DISEÑOS DE MEZCLA.

Para comparar el comportamiento de los concretos con alto contenido de ceniza volante y medir las mejoras que la ceniza puede introducir en las propiedades de las mezclas de concreto en estado fresco y endurecido, se decidió basar el estudio en 7 mezclas, cada una de las cuales tendría su correspondiente con la inclusión de ceniza volante al 50% del material cementante. Dentro de las 7 mezclas se abarcaron los concretos de resistencia baja a media, en los cuales se utilizó agregados finos y gruesos andesíticos, y los concretos que se conocen como de alto desempeño, en los cuales se utilizó agregados finos andesíticos y agregados gruesos calizos. Para los concretos de resistencia media a baja, se utilizaron consumos de cemento de 200, 250 y 300 kg/m<sup>3</sup>, y para los de alto desempeño consumos de 300, 350, 400 y 450 kg/m<sup>3</sup>.

Con lo que los diseños de mezcla a buscar quedaron como se indica en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Características de las mezclas de diseño.

Mezcla	Nombre	Cantidad en kg/m <sup>3</sup>		Agregado	
		Cemento	Ceniza	Fino	Grueso
M1	M1 C200 GA	200		Andesítico	Andesítico
	M1 HVFA200 GA	100	100	Andesítico	Andesítico
M2	M2 C250 GA	250		Andesítico	Andesítico
	M2 HVFA250 GA	125	125	Andesítico	Andesítico
M3	M3 C300 GA	300		Andesítico	Andesítico
	M3 HVFA300 GA	150	150	Andesítico	Andesítico
M4	M4 C300 GC	300		Andesítico	Calizo
	M4 HVFA300 GC	150	150	Andesítico	Calizo
M5	M5 C350 GC	350		Andesítico	Calizo
	M5 HVFA350 GC	175	175	Andesítico	Calizo
M6	M6 C400 GC	400		Andesítico	Calizo
	M6 HVFA400 GC	200	200	Andesítico	Calizo
M7	M7 C450 GC	450		Andesítico	Calizo
	M7 HVFA450 GC	225	225	Andesítico	Calizo

#### 3.1. Materiales utilizados.

##### 3.1.1. Agregados pétreos.

Se utilizaron dos tipos de agregados pétreos, andesíticos y calizos. Se decidió utilizar un solo tipo de agregado fino andesítico, mientras que para el agregado grueso se decidió utilizar dos tipos, andesítico y calizo, para ver el comportamiento

de la ceniza en las diferentes mezclas de concreto según el agregado grueso utilizado.

Se determinaron las propiedades físicas de los agregados siguiendo los ensayos de granulometría (ASTM-C-136, ASTM-C-33), densidad y absorción (ASTM-C-127, ASTM-C-128), peso volumétrico seco suelto y compactado (ASTM-C-29), partículas que pasan la malla #200 por el método del lavado (ASTM-C-117).

### **Agregado fino.**

El agregado fino andesítico provino de la mina “La Lupita” en el estado de México. De acuerdo con los ensayos realizados, la arena andesítica tuvo las siguientes propiedades físicas.

Tabla 3.2 Propiedades físicas del agregado fino andesítico.

Propiedad		Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Módulo de finura		2.68	2.66	2.67
Densidad seca	g / cm <sup>3</sup>	2.23	2.24	2.23
Densidad saturada	g / cm <sup>3</sup>	2.37	2.39	2.38
Absorción	%	6.47%	6.81%	6.64%
Pasa malla # 200	%	17.94%	19.22%	18.58%
P.V.S.S.	kg / m <sup>3</sup>	1,495	1,508	1,502
P.V.S.C.	kg / m <sup>3</sup>	1,655	1,637	1,646

De acuerdo con la norma ASTM-C-33, el porcentaje máximo recomendado de material que pasa la malla #200 debe ser 5% para concretos no expuestos a la abrasión.

La arena utilizada no cumple con esta recomendación ni con la de los límites dentro de los cuales debe estar la curva granulométrica (fig. 3.1), el porcentaje de finos que pasan por la malla #200 es de 18.6%. El no cumplir con estas recomendaciones, sobre todo la del porcentaje máximo de finos, va hacer que la mezcla requiera más agua de mezclado.

La misma norma ASTM-C-33 admite que pueden emplearse agregados que no cumplan con los requerimientos, si se demuestra que con ellos se obtienen concretos que satisfacen las especificaciones técnicas del proyecto.

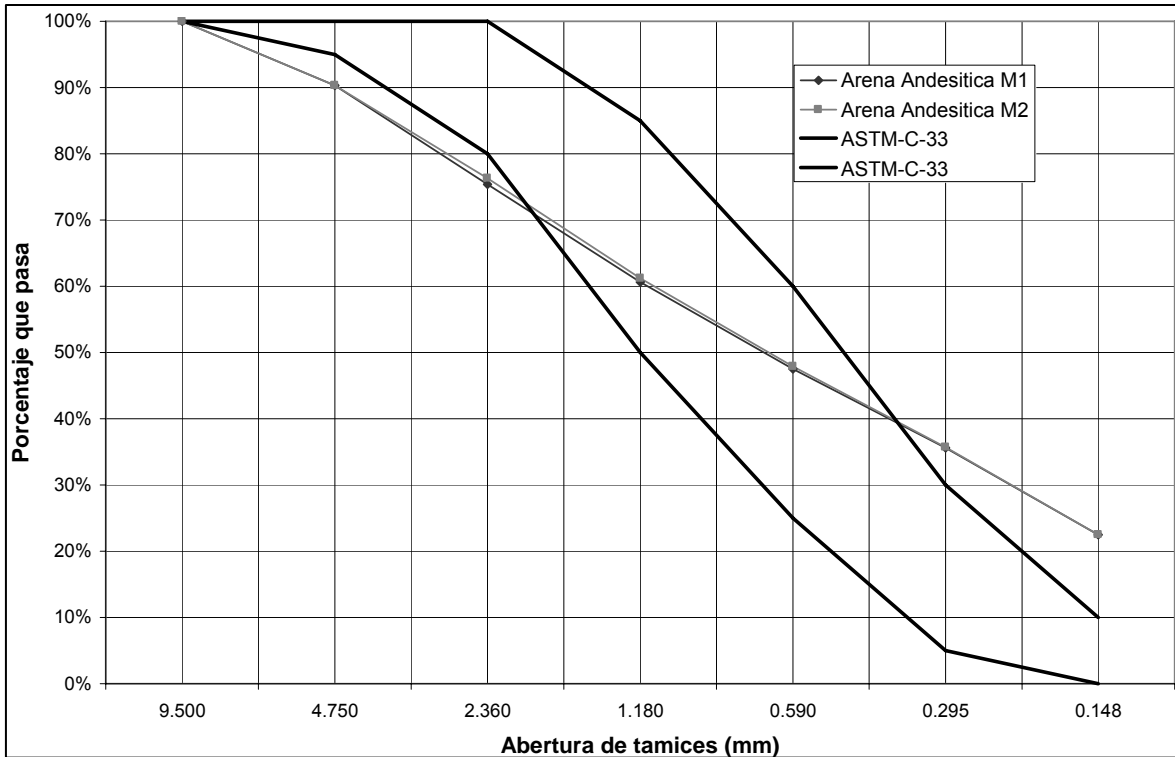


Fig. 3.1 Curva granulométrica de la arena andesítica.

Podríamos haber modificado las características de la arena para cumplir con estas recomendaciones, pero esto sólo se podría haber hecho en el laboratorio y no sería real para la industria de la construcción, puesto que es así como se usa este agregado, ya que es difícil encontrar arenas en la ciudad de México con porcentajes menores de finos y el disminuir estos valores sería un proceso costoso. Además se vio que esto no representaba un problema para los objetivos del proyecto de investigación, ya que lo que se quiere es medir las mejoras que se introducen al utilizar las cenizas volantes, y esto se va hacer al comparar las dos mezclas, una sólo con cemento como material cementante y la otra, con cemento y ceniza volante, las cuales utilizan los mismos agregados.

### **Agregado grueso.**

Se utilizaron dos tipos de agregado grueso. El agregado grueso andesítico provino de la mina “Moncayo” en el estado de México, y el agregado grueso calizo de la mina “San Carlos” en Morelos.

Las características físicas de estos agregados según los ensayos realizados se muestran abajo.

Tabla 3.3 Propiedades físicas del agregado grueso andesítico.

Propiedad		Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Tamaño máximo	pulg	3/4"	3/4"	3/4"
Densidad seca	$g / cm^3$	2.25	2.26	2.26
Densidad saturada	$g / cm^3$	2.36	2.37	2.37
Absorción	%	5.08%	4.67%	4.87%
P.V.S.S.	$kg / m^3$	1,296	1,293	1,294
P.V.S.C.	$kg / m^3$	1,384	1,426	1,405

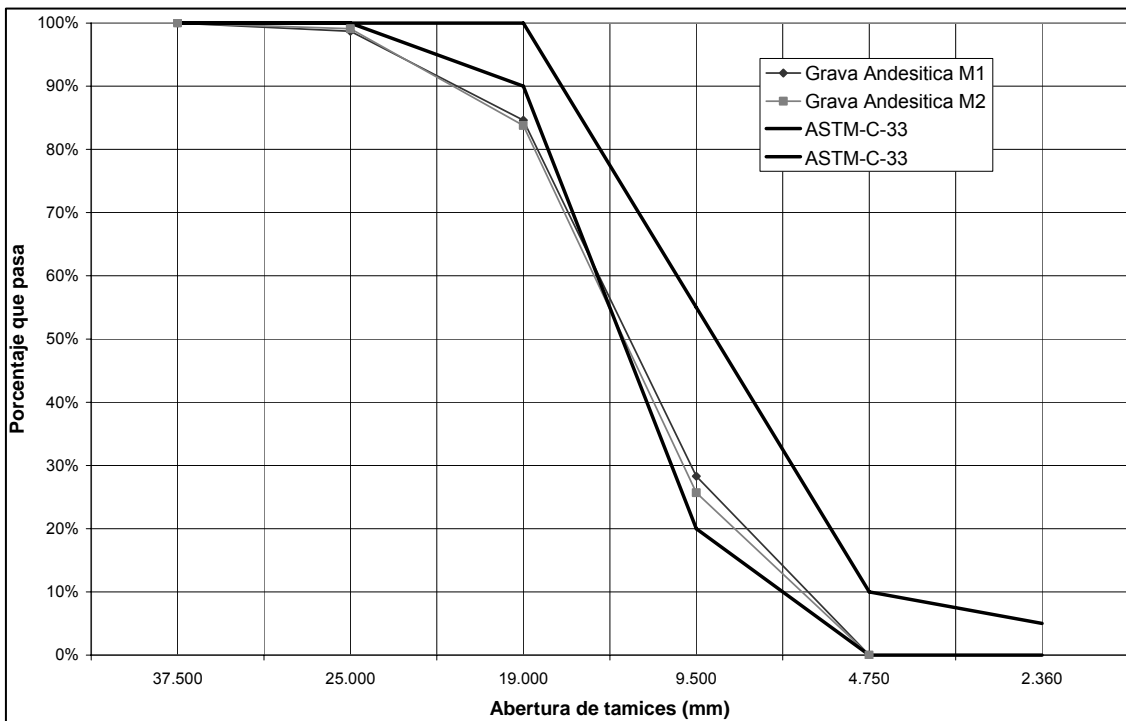


Fig. 3.2 Curva granulométrica de la grava andesítica.

Tabla 3.4 Propiedades físicas del agregado grueso calizo

Propiedad		Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Tamaño máximo	pulg	3/4"	3/4"	3/4"
Densidad seca	$g / cm^3$	2.67	2.66	2.66
Densidad saturada	$g / cm^3$	2.69	2.67	2.68
Absorción	%	0.54%	0.70%	0.62%
P.V.S.S.	$kg / m^3$	1,421	1,442	1,431
P.V.S.C.	$kg / m^3$	1,577	1,566	1,572



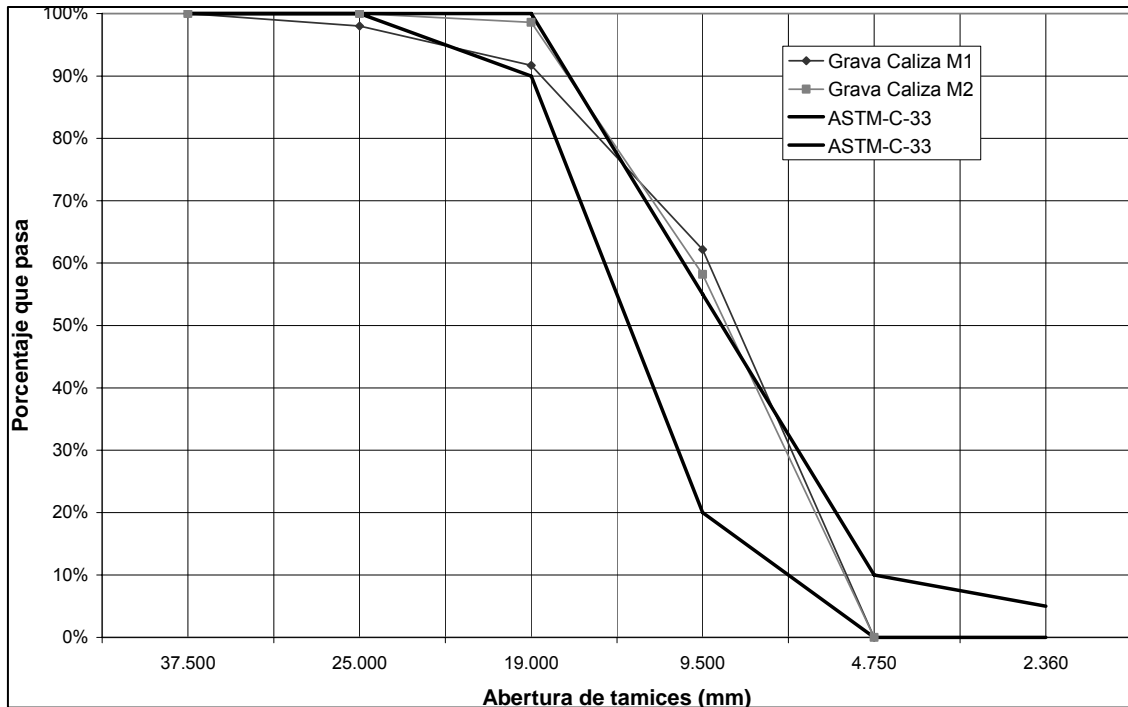


Fig. 3.3 Curva granulométrica de la grava caliza.

Como se puede ver en las curvas granulométricas, estas gravas tampoco cumplen con la recomendación de la norma ASTM-C33, pero esto no representa un problema para el objetivo de la investigación, ya que las mezclas que se comparan utilizan los mismos agregado y son estos los que se usan en la industria de la construcción. El utilizar los agregados tal como están siendo usados, nos permite medir las mejoras que introduce el uso de la ceniza volante en los concretos que se están usando en la ciudad de México, con los materiales utilizados en la industria de la construcción.

### 3.1.2. Ceniza volante.

La ceniza volante proviene de la Carboeléctrica de CFE de Río Escondido en Coahuila.

Se le hicieron los ensayos necesarios para su clasificación descritos en la norma ASTM C 618-03. Los ensayos químicos se hicieron en el laboratorio del IMCYC, de acuerdo a las normas ASTM C 311 y C 114 y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 3.5. El reporte de los resultados de los ensayos del laboratorio del IMCYC se adjunta en el Anexo.

Tabla 3.4 Resultados de los ensayos químicos de la ceniza volante.

	Resultados Obtenidos	Clase		
		N	F	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 %	92.2	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), max %	0.2	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, max %	0.5	3.0	3.0	3.0
Pérdida por calcinación, max %	2.9	10.0	6.0	6.0
Alcalis disponibles (Na <sub>2</sub> O), max %	3.7	1.5	1.5	1.5

La ceniza utilizada se clasifica como de clase F. En la tabla 3.4 se ve que la ceniza utilizada cumple con los requisitos de la norma ASTM C 618-03, excepto por el requisito de la cantidad de álcalis disponible, el cual es un requisito opcional sólo aplicable en el caso que sea solicitado específicamente.

Dentro de las pruebas para determinar las características física de la ceniza volante de la norma ASTM C 618-03, y con los métodos de ensayos de la norma ASTM C 311, se realizaron las pruebas de:

- Finura de la ceniza volante por la malla N° 325 (45 µm), de acuerdo con la norma ASTM C 430.
- Índice de actividad de resistencia con cemento Pórtland a los 7 y 28 días, de acuerdo a la norma ASTM C 109.
- Densidad, según la norma ASTM C 188 y usando la recomendación de la norma ASTM C 311, de usar 50 gr. de ceniza volante en lugar de los 64 gr. que dice en la norma C 188.
- Demanda de agua, de acuerdo a la norma ASTM C 618-03, C 305, y C 1437

Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Características físicas de la ceniza volante.

	Resultados obtenidos	Clase		
		N	F	C
Finura: Cantidad retenida en el tamizado vía húmeda en la malla de 45 $\mu\text{m}$ (N° 325), máx., %A	37	34	34	34
Índice de actividad puzolánica: B				
Con cemento Pórtland, a 7 días, mín., %	72	75	75	75
Con cemento Pórtland, a 28 días, mín., %	70	75	75	75
Demanda de agua, máx., % del control	112.5	115	105	105
Estabilidad: D				
Expansión, contracción en autoclave, máx., %		0.8	0.8	0.8
Requisitos de uniformidad:				
Densidad, máxima variación del promedio, %		5	5	5
Porcentaje retenido en 45 $\mu\text{m}$ (N° 325), variación máx., puntos de % del promedio		5	5	5

La densidad de la ceniza fue de 1.97 gr/ml. Las características físicas no cumplen con lo requerido en la norma ASTM C 618-03, la ceniza utilizada es un poco más gruesa de lo recomendado por la norma, ya que tiene 37% y no 34% de retenido por la malla #325 (45  $\mu\text{m}$ ), el índice de actividad resistente también está por debajo de lo establecido en la norma, 72% y 70% a 7 y 28 días en vez de 75%, lo mismo con la demanda de agua, que fue de 12.5% más en vez de 5% como máximo.

Aunque las características físicas no cumplan con lo recomendado por la norma, estas son las características de la ceniza tal cual está disponible en la carboeléctrica de Río Escondido en Coahuila y el estudio se hará para medir las mejoras que esta ceniza disponible le puede dar a las propiedades del concreto.

### 3.1.3. Cemento.

El cemento utilizado para todas las mezclas es CPO 30R, tipo II, según la norma NMX-C-414, con un peso específico de 3.1. Se realizaron pruebas químicas y físicas del cemento en los laboratorios del IMCYC, los resultados se adjuntan en el anexo

#### **3.1.4. Aditivos.**

Se usaron dos aditivos para las mezclas de concreto, esto siguiendo la práctica usual en la industria de la construcción. Para los concretos de resistencia baja a media con agregado andesítico, se usó el aditivo plastificante a base de lignosulfonatos Pozzolith 322N, reductor de agua tipo A según la norma ASTM C 494. Y para los concretos de alto desempeño se usaron dos aditivos, el mismo aditivo plastificante Pozzolith 322N y otro súper plastificante a base de polycarboxilatos Glenium 3030 NS, aditivo reductor de agua de alto rango tipo F según la norma ASTM C-494.

Las especificaciones técnicas del fabricante de ambos aditivos se adjuntan en el anexo.

#### **3.2. Consideraciones generales de los diseños de mezclas.**

Para cumplir con el objetivo del trabajo de investigación, el medir las mejoras que la ceniza volante le da a las propiedades del concreto, era necesario tener mezclas de concreto comparables, una mezcla convencional de concreto sólo con cemento Pórtland como cementante, y otra con ceniza, donde los cambios en las propiedades del concreto sean sólo atribuibles a la inclusión de la ceniza volante en la mezcla.

Para esto se diseñó la mezcla convencional sólo de cemento, mezcla de control, de acuerdo con el método de diseño de mezclas del ACI 211.1, las cantidades de agregados se determinaron por el método de volúmenes absolutos.

La mezcla comparable con ceniza volante se hizo remplazando el 50% del cemento por ceniza volante en esta mezcla de control y calculando los nuevos volúmenes de agregado con la misma relación arena / grava, para el mismo consumo de agua.

Ambas mezclas tendrían la misma proporción arena / grava, que fue de 50 / 50, y la misma relación agua / cementantes, y por consiguiente la misma cantidad de agua por  $m^3$ , ya que la cantidad de cementantes en las mezclas comparables es la misma, una con el 100% de cemento Pórtland y la otra con 50% de cemento y 50% de ceniza volante.

Esto difiere de lo dicho por Malhotra y Mehta, quienes recomiendan que en la mezcla de concreto que contiene ceniza volante, el consumo de agua se disminuya en un

20%, ya que la ceniza volante aumenta la trabajabilidad de la mezcla y esto hace que el requerimiento de agua disminuya para un revenimiento dado.

A pesar de lo dicho por Malhotra, se decidió que la relación agua / cementante sea la misma para ambas mezclas, la de control y la que contiene ceniza volante, esto para no introducir una variable más en el proyecto y considerar que las diferencias obtenidas en las propiedades del concreto se deben sólo a la inclusión de ceniza volante, y no a una menor relación agua / cementante.

La cantidad de agua se estableció en pruebas preliminares, buscando mezclas iniciales, sin la inclusión de aditivos, con revenimientos de 1 a 2 cm., para tener el menor consumo de agua posible. El revenimiento final deseado, entre 10 y 15 cm., se alcanzaría con la inclusión de los aditivos plastificantes y súper plastificantes.

En las mezclas de resistencia baja a media con agregado Andesítico se evito el uso de un aditivo súper plastificante, de acuerdo con las prácticas usuales de la industria de la construcción. En los concretos de alto desempeño con agregado grueso calizo, se utilizo además un aditivo súper plastificante de alto rango. La proporción utilizada de los aditivos estuvo dentro de los rangos dados por el fabricante.

En la tabla 3.6 se muestran los diseños de las 14 mezclas.

Tabla 3.6 Proporcionamiento empleado en los diseños de mezcla.

Mezclas		Materiales por m3								Masa Volumétrica kg / m <sup>3</sup>	Relación A/C
		Cemento	Ceniza volante	Arena Andesítica	Grava Andesítica	Grava Caliza	Agua	Pozzoloth 322 N	Glenium 3030 NS		
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	ml	ml		
Agregados Andesíticos	M1 C200 GA	200.00		838.13	845.63		165.00	933.00	0.00	2,048.76	0.83
	M1 HVFA200 GA	100.00	100.00	818.01	825.33		165.00	453.00	0.00	2,008.34	0.83
	M2 C250 GA	250.00		826.95	834.35		160.00	1,100.00	0.00	2,071.30	0.64
	M2 HVFA250 GA	125.00	125.00	802.37	809.55		160.00	1,100.00	0.00	2,021.92	0.64
	M3 C300 GA	300.00		786.72	793.76		180.00	1,000.00	0.00	2,060.48	0.60
	M3 HVFA300 GA	150.00	150.00	755.43	762.19		180.00	1,350.00	0.00	1,997.62	0.60
Grava Caliza, Arena Andesítica	M4 C300 GC	300.00		797.90		951.41	170.00	1,350.00	3,000.00	2,219.31	0.57
	M4 HVFA300 GC	150.00	150.00	766.61		914.10	170.00	1,350.00	3,000.00	2,150.71	0.57
	M5 C350 GC	350.00		768.84		916.76	180.00	1,575.00	2,500.00	2,215.60	0.51
	M5 HVFA350 GC	175.00	175.00	733.08		874.12	180.00	1,575.00	1,000.00	2,137.20	0.51
	M6 C400 GC	400.00		744.26		887.45	185.00	1,800.00	1,000.00	2,216.71	0.46
	M6 HVFA400 GC	200.00	200.00	701.79		836.81	185.00	1,800.00	1,000.00	2,123.60	0.46
	M7 C450 GC	450.00		726.38		866.13	185.00	2,000.00	3,500.00	2,227.51	0.41
M7 HVFA450 GC	225.00	225.00	679.44		810.16	185.00	2,000.00	3,500.00	2,124.60	0.41	

Malhotra y Mehta dan algunas recomendaciones para los diseños de mezcla de concretos de alto desempeño con alto contenido de ceniza volante:

- Se debe mantener un mínimo de 50% en peso del material cementante, de ceniza volante.
- Bajo consumo de agua, generalmente menos de  $130 \text{ kg} / \text{m}^3$ .
- Contenido de cemento generalmente no más de  $200 \text{ kg} / \text{m}^3$ .
- Para mezclas de concreto con resistencia a la compresión a 28 días de 30 MPa o mayores, revenimientos mayores a 150 mm, y relaciones agua / cementantes del orden de 0.3, el uso de reductores de agua de alto rango es obligatorio.
- Para concretos expuestos a ciclos de congelación y deshielo, el uso de un aditivo inclusor de aire que resulte en un adecuado espaciamiento de vacíos de aire, es obligatorio.
- Para concretos con revenimientos menores a 150 mm. y resistencias a compresión a 28 días menores a 30 MPa, los concretos con alto contenido de ceniza volante (HVFA) con relaciones agua / cementantes del orden de 0.4 pueden usarse sin la inclusión de un aditivo superplastificante.

Estas recomendaciones se tomaron en cuenta para el diseño de las mezclas, considerando las características de los materiales utilizados y los objetivos del proyecto.

Se consideró un 50% de reemplazo de ceniza, pero se prepararon mezclas con otros porcentajes de reemplazo para ver cual sería la proporción óptima de reemplazo de material cementante por ceniza volante.

Se intentó llegar a consumos de agua del orden de  $130 \text{ kg} / \text{m}^3$  pero debido a las características de los materiales utilizados los consumos finales de agua, que se obtuvieron realizando mezclas preliminares, variaron desde los 160 hasta los  $185 \text{ kg} / \text{m}^3$ . La arena utilizada tenía un contenido de finos elevado, mayor a 18%, lo que aumenta el requerimiento del agua de mezclado.

Se utilizaron mezclas con consumos de cementantes desde 200 hasta  $450 \text{ kg} / \text{m}^3$  debido a los objetivos del proyecto: ver el desempeño de la ceniza volante en mezclas de concreto dentro de un rango más o menos amplio de resistencias.

Los rangos de la relación agua / cementante de las mezclas estuvo entre 0.41 y 0.83, y aunque estos no fueron menores a 0.4 se decidió usar un aditivo superplastificante para llegar a los revenimientos deseados (10 – 15 cm.).

No se consideró el uso de un aditivo inclusor de aire ya que no se considerarían concretos expuestos a ciclos de congelación y deshielo.

### **3.3. Variaciones del porcentaje de reemplazo de ceniza volante.**

Una de las variables a tener en cuenta para el estudio es la proporción de reemplazo del material cementante por ceniza volante. La magnitud en que la ceniza volante influya en las propiedades de las mezclas de concreto dependerá de la cantidad de ésta presente en el concreto.

De la revisión de la bibliografía y de estudios anteriores realizados, se estima que mientras mayor sea la proporción de reemplazo del material cementante por ceniza volante, es decir mientras más ceniza volante tenga la mezcla, algunas propiedades mecánicas del concreto disminuirán, siendo la principal la resistencia a compresión, mientras que otras propiedades pueden mejorar, como la permeabilidad.

Lo deseable sería obtener una mezcla de concreto con la mayor proporción de reemplazo de material cementante por ceniza volante, ya que con esto se tendrían mezclas de concreto más baratas y se aprovecharía en mayor cantidad el material de desperdicio que es la ceniza volante y aumentarían los beneficios ambientales que esto trae. Pero esto tiene una limitante en las resistencias que se puedan obtener con estas mezclas, sobre todo en la resistencia a compresión que es un parámetro muy importante en el concreto.

Debido al alcance del estudio realizado y para limitar la cantidad de mezclas y ensayos a realizar se decidió fijar esta variable a una misma proporción de reemplazo de material cementante por ceniza para todas las mezclas. Esta proporción debía ser la máxima posible siempre y cuando se puedan obtener resistencias comparables a las de una mezcla de control de concreto con cemento Pórtland.

Para esto se hicieron 3 mezclas con diferentes proporciones de reemplazo de material cementante por ceniza volante y una mezcla de control de cemento Pórtland. Las proporciones de reemplazo fueron de 60%, 50% y 40%.



Tabla 3.7 Proporcionamiento de las mezclas.

Ceniza : cemento	Materiales por m <sup>3</sup>							P.U kg / m <sup>3</sup>	A/C
	Cemen to	Ceniza volante	Arena	Grava Caliza	Agua	Pozzolith 322 N	Glenium 3030 NS		
	kg	kg	kg	kg	kg	ml	ml		
<b>0:100</b>	300		797.90	951.41	170	1,350	3,000	2,219	0.57
<b>50:50</b>	150	150	766.61	914.10	170	1,350	3,000	2,151	0.57
<b>40:60</b>	180	120	773.31	922.09	170	1,350	3,000	2,165	0.57
<b>60:40</b>	120	180	759.90	906.10	170	1,350	3,000	2,136	0.57

En la tabla 3.7 se muestran las proporciones de los diseños de mezcla. En todas las mezclas, incluyendo la mezcla de control, la cantidad de cementante, cemento pórtland más ceniza volante, es la misma y tienen el mismo consumo de agua, por lo que la relación agua / cementantes es la misma. También se mantuvo la proporción de agregado fino a grueso de 50 / 50. En general se trató de mantener el mismo diseño mezcla sólo variando la proporción de reemplazo de cemento por ceniza volante, para que sea ésta la variable a observar.

Para cada una de estas mezclas se fabricaron 6 cilindros de 15 x 30 cm. para ensayos de resistencia a compresión, 3 cilindros se ensayaron a 28 días y 3 a 90 días en cada mezcla.

Se midieron algunas propiedades del concreto en estado fresco, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Propiedades del concreto en estado fresco.

Mezcla	Revenimiento	Masa volumétrica	Contenido de aire
ceniza : cemento	cm.	kg / m <sup>3</sup>	%
60:40	9.70	2,232.81	1.82%
50:50	21.97	2,248.13	1.83%
40:60	12.13	2,270.58	2.12%
0:100	23.08	2,308.73	1.42%

Como se puede ver en la tabla, la masa volumétrica disminuye conforme aumenta la proporción de reemplazo de material cementante por ceniza volante, esto es de esperarse ya que la ceniza volante es menos densa que el cemento.

En los revenimientos se ve que hay una diferencia notoria entre las mezclas con 60% y 40% de proporción de reemplazo contra las de 0% y 50% de reemplazo, sobre todo

si las 4 mezclas tienen la misma cantidad de agua y aditivos por m<sup>3</sup>. Las mezclas con 60% y 40% se prepararon casi juntas, sin mayor diferencia de tiempo, lo mismo que las mezclas de 0% y 50%, pero si hubo una diferencia de tiempo entre las dos primeras y las dos últimas. Lo que pudo hacer que haya habido alguna diferencia entre los aditivos usados. De todas maneras si los comparamos por pares, se puede notar que en ambos casos las mezclas con mayor contenido de ceniza tienen menores revenimientos. La mezcla con 60% de proporción de reemplazo tiene un revenimiento de 9.7 cm., que es menor a los 12.13 cm. de revenimiento que se obtuvo en la mezcla con 40% de proporción de reemplazo. Lo mismo con la mezcla que tiene 50% de reemplazo, que tiene un revenimiento de 21.97 cm., y es menor que los 23.08 cm que se obtuvo en la mezcla de control, sin ceniza volante sólo con cemento pórtland. Esto contrario a lo que dicen Malhotra y Mehta, que al incluir ceniza volante a las mezclas de concreto estas adquieren mayor trabajabilidad debido a la forma de sus partículas.

Los resultados de resistencias a compresión a 28 y 90 días se muestran en la tabla 3.9. En la tabla 3.10 se expresan estos valores de resistencia como un porcentaje de las resistencia obtenida en la mezcla de control (0:100) para ambas edades, y en la tabla 3.11 la resistencia a 90 días se expresa como porcentaje de la resistencia obtenida a 28 días para cada mezcla.

Tabla 3.9 Resistencias a compresión.

Edad (días)	<b>60:40</b>	<b>50:50</b>	<b>40:60</b>	<b>0:100</b>
28	194.69	210.54	266.36	370.50
90	309.82	334.35	355.62	425.44

Tabla 3.10 Porcentaje con respecto a la resistencia de la mezcla de control.

Edad (días)	<b>60:40</b>	<b>50:50</b>	<b>40:60</b>	<b>0:100</b>
28	52.55%	56.83%	71.89%	100.00%
90	72.82%	78.59%	83.59%	100.00%

Tabla 3.11 Porcentaje con respecto a la resistencia a 28 días.

Edad (días)	<b>60:40</b>	<b>50:50</b>	<b>40:60</b>	<b>0:100</b>
28	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
90	159.13%	158.81%	133.51%	114.83%

En las tablas se ve que la resistencia a la compresión disminuye con el aumento de la proporción de reemplazo de material cementante por ceniza volante, pero esta resistencia se va acercando a la de la mezcla de control con el tiempo. Esto se puede ver en la figura 3.4

A los 28 días las resistencias a compresión están entre el 53% y 72% de la resistencia de la mezcla de control, y a los 90 días aumentan hasta llegar entre el 73% y 84%.

En la tabla 3.11 se ve que la ganancia de resistencia en el tiempo es mayor en las mezclas que tienen mayor cantidad de ceniza volante, una mayor proporción de reemplazo de material cementante por ceniza volante; mientras que en la mezcla de control la ganancia de resistencia a los 90 días es de 15% con respecto a los 28 días, en las mezclas con ceniza volante esta ganancia es del 34% al 60%.

La ganancia de resistencia a los 90 días para las mezclas con 60% y 50% de proporción de reemplazo es muy parecida, con 159% y 158% respectivamente, la diferencia es menor al 1%; si comparamos estas ganancias de resistencia con la de la mezcla con 40% de proporción de reemplazo, 133%, si encontramos una diferencia mayor.

Si comparamos el porcentaje de resistencia con respecto a la mezcla de control a los 28 días, se encuentra una diferencia entre la mezcla con 40% de proporción de reemplazo, que es de 72%, y las mezclas de 50% y 60% de reemplazo que tienen 57% y 53%, respectivamente. Esta diferencia disminuye a los 90 días, debido a la mayor ganancia de resistencia en el tiempo de las mezclas con 50% y 60% de reemplazo, siendo 84% de la resistencia de la mezcla de control para la mezcla con 40% de reemplazo y 79% y 73% para las mezclas con 50% y 60% de reemplazo respectivamente.

La elección de una proporción de reemplazo de materiales cementantes por ceniza volante con base sólo en estos ensayos de resistencia a compresión puede resultar poco fundamentada, pero al ver que las diferencias en los resultados dentro de este intervalo de proporción de reemplazo no son muy grandes, y al necesitar fijar esta proporción para los alcances del estudio se decidió usar la proporción de reemplazo de 50%, esto también basándose en la recomendación de Malhotra y Mehta de utilizar proporciones de reemplazo mayores al 50%.

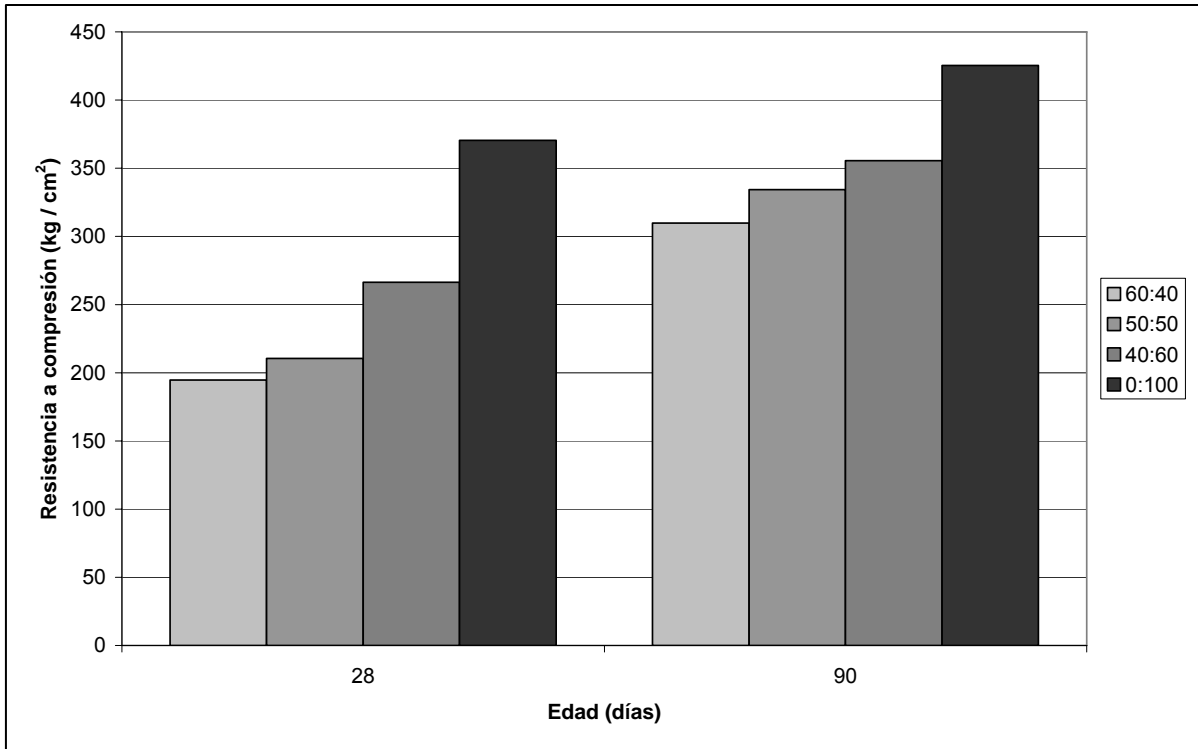


Figura 3.4 Resistencia a compresión.

#### 4. PROPIEDADES DEL CONCRETO.

El concreto es un material heterogéneo, por lo tanto no isotrópico ya que no conserva las mismas propiedades en las diferentes direcciones. Esto se debe a que el concreto esta compuesto de varios materiales, a la variabilidad individual de cada uno de ellos y al mismo proceso de elaboración.

Las propiedades del concreto dependen en gran parte del acomodo de estos materiales en la estructura del concreto, en la porosidad o sistema de vacíos que se forme en ese acomodo.



Fig. 4.1 Probetas de concreto cortadas.

El presente trabajo se basó en comparar las propiedades de las distintas mezclas de concreto, por lo que se ensayaron y midieron algunas propiedades en estado fresco y otras en estado endurecido.

##### 4.1. Concreto en estado fresco.

Las mezclas de concreto se elaboraron en 3 tandas del mismo volumen cada una, y se trató de que en cada muestra hubiera al menos una probeta de cada tanda. Para esto se utilizó una mezcladora de 100 litros de capacidad. Primero se colocó la arena y la grava junto con el agua de absorción y se mezcló por 1 minuto, después se

agregó el cementante, cemento Pórtland o cemento Pórtland más ceniza volante, y el agua restante, dejándolos mezclar por 3 minutos. Luego se dejaba en reposo por 3 minutos, tapando la mezcladora con un trapo húmedo para evitar que la mezcla pierda humedad. Se reiniciaba el mezclado por 1 minuto y se agregaba el plastificante, dejándolo mezclar durante 1 minuto más, finalmente se añadía el súper plastificante dejándolo mezclarse por 1 minuto adicional. Inmediatamente después de terminado el mezclado se procedía a realizar las pruebas del concreto en estado fresco.

Las propiedades del concreto en estado fresco que se midieron fueron la trabajabilidad, el contenido de aire y el peso volumétrico.

#### **4.1.1. Trabajabilidad.**

Se define como la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto. Está influenciada por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural y/o inducido de la masa de concreto.



Fig. 4.2 Medición del revenimiento.

Malhotra y Mehta describen el mecanismo por el cual la ceniza volante mejora la trabajabilidad de las mezclas de concreto. Dicen que generalmente las mezclas de concreto no tienen una óptima distribución del tamaño de partículas y esto

favorece a un indeseable requerimiento alto de agua para lograra la trabajabilidad deseada. Además las partículas de cemento pórtland, debido a la presencia de cargas eléctricas en la superficie, tienden a formar flóculos que atrapan grandes volúmenes de agua de mezclado.

Cuando se utiliza ceniza volante en las mezclas de concreto, sus partículas finas son atraídas hacia la superficie de las partículas de cemento debido a su carga opuesta, esto evita la floculación, las partículas de cemento son dispersadas y no atrapan grandes cantidades de agua, esto significa que el sistema tendrá una reducción del requerimiento de agua para lograr una consistencia dada. Otra de las maneras en que la inclusión de ceniza volante ayuda a la trabajabilidad de las mezclas de concreto es debido a la forma esférica y la suavidad de la superficie de sus partículas, esto ayuda a reducir la fricción entre las partículas y facilita la movilidad.

Para medir la trabajabilidad de las mezclas se utilizó la prueba de revenimiento, o asentamiento en el cono de Abrahams, la prueba se hizo siguiendo la norma ASTM C 143.

#### 4.1.2. Contenido de aire y peso volumétrico.



Fig. 4.3 Equipo para medir el peso volumétrico y el contenido de aire

Al ser la ceniza volante un material menos denso que el cemento, peso específico de 1.97 contra 3.1, se espera que los concretos con ceniza volante tengan un menor peso volumétrico.

Esta menor densidad hace que para un mismo peso exista un mayor volumen de ceniza volante que el que habría de cemento, por lo que la ceniza volante rellenará mejor los vacíos entre el agregado de la mezcla y el contenido de aire disminuirá.

El peso volumétrico se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 138, y el contenido de aire fue determinado por el método de presión siguiendo la norma ASTM C 231.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos para las propiedades del concreto en estado fresco.

Tabla 4.1 Propiedades del concreto en estado fresco.

Mezcla		Revenimiento	Masa volumétrica	Contenido de aire
		cm	kg / m <sup>3</sup>	%
M1	C	15	2,186	3.70%
	HVFA	17	2,147	3.63%
M2	C	5	2,223	3.17%
	HVFA	6	2,157	3.75%
M3	C	18	2,196	3.37%
	HVFA	14	2,149	3.35%
M4	C	23	2,309	1.42%
	HVFA	22	2,248	1.83%
M5	C	24	2,301	1.62%
	HVFA	18	2,230	2.35%
M6	C	15	2,309	3.10%
	HVFA	8	2,216	2.70%
M7	C	22	2,315	2.85%
	HVFA	16	2,211	2.60%

#### 4.2. Concreto en estado endurecido.

Para estudiar las propiedades del concreto en estado endurecido, se fabricaron probetas cilíndricas de dos dimensiones: cilindros de 15 x 30 cm. para ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tensión indirecta por compresión diametral y deformación diferida o flujo plástico, y cilindros de 10 x 20 cm. para ensayos de permeabilidad a los cloruros. También se fabricaron barras



prismáticas de 7.5 x 7.5 x 25 cm. para ensayos de contracción por secado y resistencia al ataque de sulfatos.



Fig. 4.4 Probetas recién moldeadas.

El procedimiento de moldeado de las probetas se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 192. Los moldes se llenaron en dos capas, compactando cada capa en una mesa vibradora, una vez llenos se enrasaron y se dejaron 24 horas, después de este tiempo se desmoldaron y se llevaron al cuarto de curado húmedo, a temperatura y humedad controladas, en donde permanecieron hasta la fecha de ensayo.



Fig. 4.5 Mesa vibradora utilizada.

El día anterior al ensayo las probetas se retiraban de la cámara de curado húmeda, para ser medidas y pesadas, después de lo cual se cabeceaban con una capa de

azufre para asegurar la uniformidad y el paralelismo de sus caras de apoyo. Este cabeceo se realizó siguiendo la norma ASTM C 617.

#### 4.2.1. Resistencia a la compresión.

Es la medida de la resistencia del concreto a la carga axial. Depende principalmente de la concentración de la pasta que se expresa en términos de la relación agua / cementantes, en este caso agua / cemento + ceniza volante, ( $a/(c+cv)$ ). Influye también la calidad de los agregados, el grado de compactación de la mezcla y las condiciones de curado.

En las mezclas con ceniza volante, se espera que esta resistencia sea menor en comparación con la mezcla de control, hechas sólo con cemento pórtland como cementante, sobre todo a edades tempranas, ya que la ceniza aún no ha reaccionado. A edades tardías, cuando la ceniza volante ya ha reaccionado, se espera que estas resistencias se acerquen más a la de la muestra de control, llegando en algún momento incluso a ser mayores.

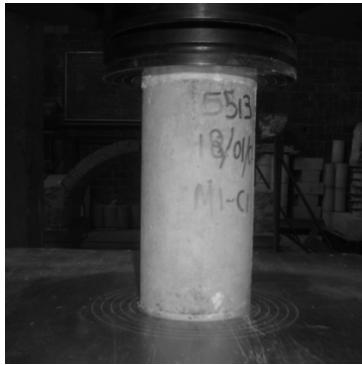


Fig.4.6 Probetas de 15 x 30 cm. ensayadas a compresión.

Se hicieron ensayos a 7, 14, 28 y 90 días, para cada ensayo se hicieron 3 probetas de 15 x 30 cm. Los ensayos se realizaron siguiendo la norma ASTM C 39. Para la aplicación de la carga se utilizó una prensa universal con capacidad de 250 ton y la velocidad de carga fue de 25 ton/ min.

Los resultados obtenidos para la resistencia a compresión se muestran en la tabla 4.2



Fig. 4.7 Prensa universal utilizada.

#### 4.2.2. Resistencia a la tensión indirecta por compresión diametral.

La resistencia a la tensión siempre se ha relacionado con la resistencia a la compresión, como se hace con la mayoría de las otras propiedades del concreto; se relaciona con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión ( $\sqrt{f'c}$ ). En concretos convencionales de cemento Pórtland varía entre 1.33 y 1.99  $\sqrt{f'c}$ , esto es entre un 8% y 10 % de la resistencia a la compresión.



Fig. 4.8 Ensayo de tensión indirecta.

Para las mezclas de concreto con ceniza volante se espera que se mantengan estos rangos de relaciones entre la resistencia a la tensión y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (Malhotra y Mehta, 2002), aunque en valores absolutos se esperan que sean menores, ya que se alcanzan menores resistencias a compresión, sobre todo a edades tempranas.

Para estudiar la resistencia a tensión indirecta por compresión diametral se hicieron ensayos a 28 y 90 días, para cada ensayo se fabricaron 3 probetas de 15 x 30 cm. Se siguió la norma ASTM C 496. Se utilizó una prensa universal con capacidad de 250 ton, y la velocidad de carga fue de 8 ton/min.

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de los ensayos a tensión indirecta por compresión diametral.



Fig. 4.9 Forma de rotura de las probetas ensayadas a tensión indirecta.

Tabla 4.2 Resistencias a compresión en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	214	54	321	114	338	142	313	147	357	196	442	226	500	270
14	265	71	379	151	393	177	342	194	407	224	488	279	550	316
28	276	89	421	174	400	196	370	211	438	251	532	326	563	357
90	301	158	474	269	461	322	425	334	462	357	576	418	653	474

Tabla 4.3 Resistencias a tensión indirecta por compresión diametral en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	20.5	9.4	29.1	14.6	23.6	16.7	30.8	20.0	33.4	23.0	42.1	26.0	41.8	26.9
90	25.0	16.1	30.8	22.0	31.8	24.1	34.0	28.0	41.4	30.3	45.5	27.9	43.3	30.8

Tabla 4.4 Módulo de elasticidad en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	148,544	103,899	173,503	134,330	175,618	141,597	269,370	219,772	266,621	228,277	298,464	234,359	315,911	258,066
90	177,695	141,922	202,249	163,550	195,893	170,363	289,931	249,849	292,170	258,716	333,037	288,726	334,942	303,212

Tabla 4.4 Relación de Poisson.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	0.25	0.16	0.27	0.22	0.29	0.23	0.30	0.26	0.30	0.27	0.33	0.25	0.33	0.31
90	0.28	0.23	0.28	0.28	0.30	0.26	0.31	0.28	0.30	0.28	0.32	0.24	0.33	0.32

### 4.2.3. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad se define como la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación unitaria en compresión. Su valor esta asociado a la resistencia a compresión, varia con la  $\sqrt{f'c}$ . En concretos con ceniza volante se esperan valores menores a los de la mezcla de control, debido a una menor resistencia.

Para comparar el módulo de elasticidad de las mezclas con ceniza volante se hicieron ensayos a 28 y 90 días, para cada ensayo se fabricaron 3 probetas de 15 x 30 cm. Los ensayos se hicieron siguiendo la norma ASTM C 469. Se utilizó una prensa universal de 250 ton de capacidad y la velocidad de carga aplicada fue de 25 ton/min. Se utilizó un compresómetro (Figura 4.10) con transductores de desplazamiento tipo LVDT para el registro de las deformaciones axiales y transversales. Para la adquisición de datos se utilizó un sistema de captura multicanal TDS-302 (Figura 4.11).



Fig. 4.10 Compresómetro



Fig. 4.11 Sistema de captura multicanal.

Con los datos de deformaciones axiales y transversales para cada carga, se calcularon los esfuerzos y deformaciones unitarias para trazar la curva esfuerzo-deformaciones unitarias.

El módulo de elasticidad se calculó con la pendiente de la recta que pasaba por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 50 millonésimas.

También se calculó la relación de Poisson, dividiendo la pendiente de la recta de las deformaciones unitarias transversales, dentro de los mismos rangos del módulo de elasticidad, entre el módulo de elasticidad calculado.

La relación de Poisson es la relación entre la deformación transversal que se genera cuando el espécimen se deforma debido a una carga axial, y la deformación axial.

En la figura 4.12 se muestra la curva esfuerzo - deformación trazada para la tercera probeta (M28-C3) de la mezcla M5 C350 GC. En ella se ven dos curvas de las deformaciones axiales y una correspondiente a las deformaciones transversales.

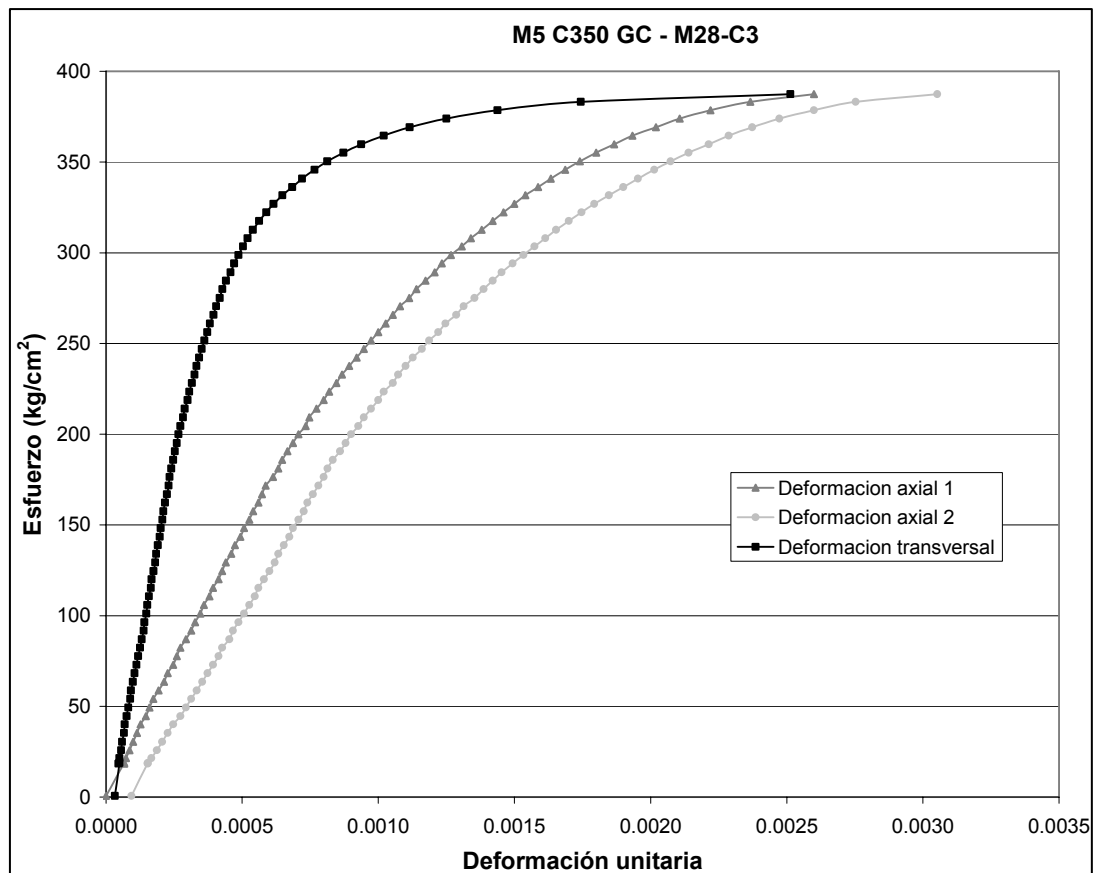


Fig. 4.12 Curvas esfuerzo – deformación unitaria.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad de las diferentes mezclas, y en la tabla 4.5, las relaciones de Poisson.

#### 4.2.4. Contracción por secado.

La contracción es una de las causas más frecuentes de cambios volumétricos y se manifiesta hasta de 3 maneras diferentes: Contracción intrínseca o espontánea, contracción por secado, y contracción por carbonatación.

La contracción intrínseca es la contracción de fraguado, producto del proceso químico de hidratación del cemento y su propiedad de disminuir el volumen en este estado. Esta retracción es irreversible y no depende de los cambios de humedad, depende exclusivamente del tipo y características del cemento. El orden de magnitud de la deformación unitaria atribuida a este tipo de contracción oscila entre  $10$  y  $150 \times 10^{-6}$  para concretos con cemento pòrtland, y en términos generales no produce fisuración pues las tensiones que produce son bajas (2 a 8  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

La contracción por secado se produce por la pérdida de humedad de la pasta debido a agentes externos como la temperatura, viento, humedad relativa. El mecanismo es físico, causado primero por la pérdida del agua de los poros capilares, cuyo efecto es despreciable, y luego por la evaporación del agua de adsorción contenida en los poros del gel. Este efecto no es irreversible. Produce deformaciones unitarias que varían desde los 400 hasta  $1100 \times 10^{-6}$  en concretos de cemento pòrtland sin ningún tipo de control. Las tensiones que producen pueden variar entre 100 y  $275 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , que superan normalmente la capacidad resistente en tensión y es generalmente la causa principal de fisuración del concreto.



Fig. 4.13 Almacenaje de las barras de contracción por secado en la cámara seca.



La contracción por carbonatación se produce sólo en el concreto endurecido, por la reacción de los cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de los productos de hidratación del cemento comprimidos por la contracción por secado, con el  $\text{CO}_2$  del ambiente formándose el  $\text{CaCO}_3$  con una reducción de volumen inicial. La humedad durante la exposición al bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el factor principal que influye en la contracción por carbonatación. Los mayores valores se producen para humedades relativas del orden del 50%, mientras que es despreciable para humedades relativas cercanas al 100% o por debajo del 25% (Verbeck G, 1958). Las deformaciones unitarias que produce varían entre 10 a  $100 \times 10^{-6}$ , con tensiones de 2 a  $20 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que no ocasiona fisuración en la mayoría de los casos. Para medir la contracción por secado se fabricaron barras prismáticas de  $7.5 \times 7.5 \times 25 \text{ cm}$  y se curaron por 28 días sumergidas en agua con cal, dentro de un cuarto de curado con temperatura y humedad controladas. La prueba se hizo siguiendo la norma ASTM C 157.

La medición de la contracción por secado se basó en el cambio de longitud de los prismas, que se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 490.

La relación  $a/(c+c_v)$  y el contenido de agua son dos variables que influyen en gran medida en la contracción por secado, por lo que en los proporcionamientos de mezcla (tabla 3.6) se mantienen constantes para la mezcla patrón y la de ceniza volante, las mezclas a comparar.



Fig. 4.14 Comparador de longitudes.

Tabla 4.5 Contracción por secado calculadas a diferentes edades.

$\epsilon_t \times 10^{-6}$ (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	326	370	367	336	243	345	176	181	171	291	163	188	197	110
14	469	544	523	489	367	514	253	275	252	401	242	274	294	181
28	600	712	664	634	492	682	322	373	331	495	321	354	391	268
56	698	841	767	745	594	815	373	453	392	561	383	415	468	352
90	744	904	815	797	644	880	397	493	422	591	413	444	506	399
140	774	945	846	831	678	923	413	520	441	610	433	463	531	433
180	786	962	859	846	692	942	419	532	450	618	441	471	542	449
365	810	995	884	873	719	976	431	554	465	632	457	486	562	479
730	822	1,012	896	887	733	994	438	565	473	640	465	494	573	495
$\epsilon_u$	834	1,029	909	901	748	1,013	444	577	482	647	474	502	583	512

En la tabla 4.5 se muestran los valores de la contracción por secado para todas las mezclas. Estos valores son los calculados después del ajuste que se hizo a los datos de cada mezcla con una ecuación de la forma:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{a+t} \right) \varepsilon_u$$

Donde:

- $\varepsilon_t$ : deformación unitaria de contracción por secado a la edad "t".
- t: tiempo.
- a: constante que depende de las características de cada mezcla.
- $\varepsilon_u$ : contracción por secado última.

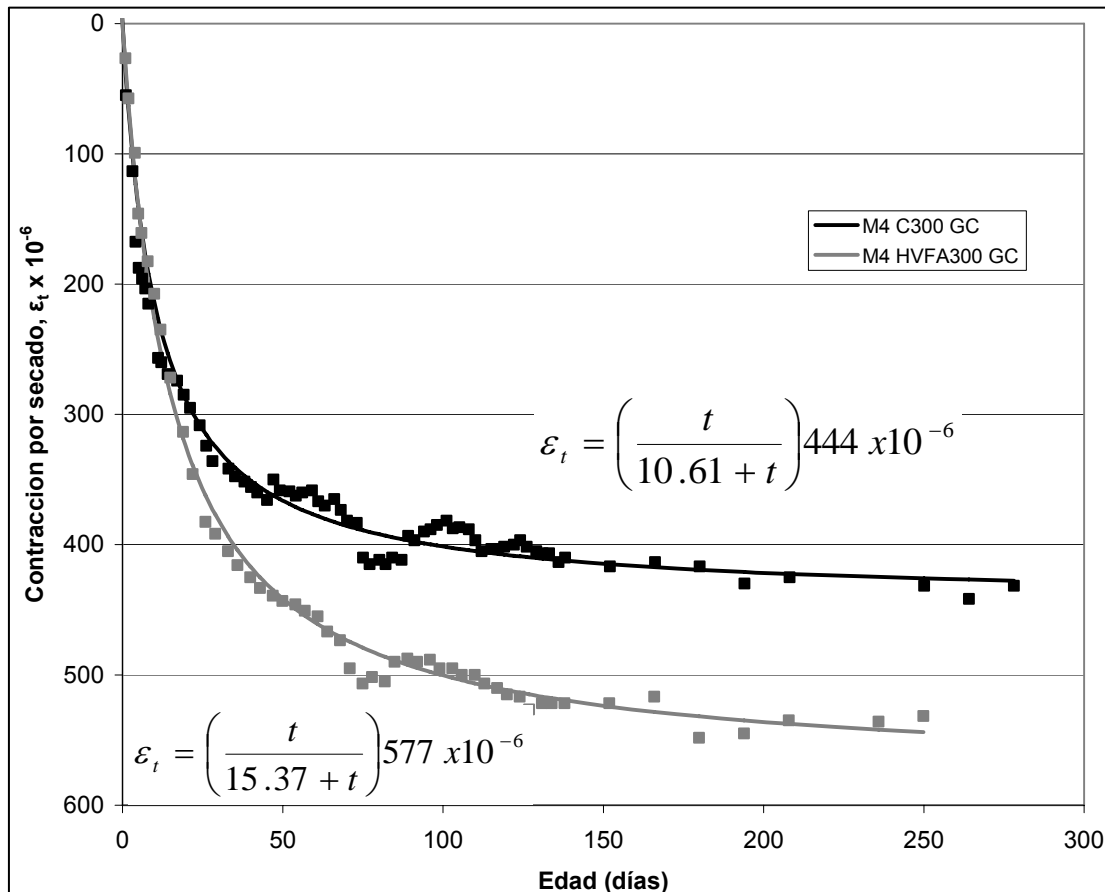


Fig. 4.15 Gráficas de contracción por secado en las mezclas M4.

En la figura 4.15 se ven las gráficas de la contracción por secado para las mezclas M4 C300 GA y M4 HVFA300 GA. Se ven los puntos de las mediciones hechas a distintas edades y las ecuaciones con las que se ajustaron estos datos.

#### 4.2.5. Deformación diferida.

La deformación diferida o flujo plástico, es el incremento de la deformación unitaria en el concreto, bajo una carga constante y permanente.

Es una característica inherente a la pasta de cemento endurecido, se le relaciona con un acomodo interno de las partículas de la pasta.

Se demuestra experimentalmente (Zambetti G, 1982) que la deformación plástica bajo carga constante es proporcional a la deformación elástica, y para cargas inferiores a la de rotura, la deformación plástica es proporcional a la carga. El flujo del concreto aumenta con el incremento de la carga continua y es inversamente proporcional a la resistencia a compresión.



Fig. 4.16 Marcos de carga.

El tipo y contenido de agregado, como sucede también en el caso de la contracción, tiene una influencia importante en los valores del flujo.

Otro efecto importante del flujo plástico, aparte del cambio volumétrico que se produce en el concreto, es la relajación o reducción gradual de los esfuerzos en compresión.

Aunque en términos cualitativos se considera el flujo independiente de la contracción, estos están interrelacionados, por lo que un concreto con valores bajos de contracción, tendrá también deformaciones por flujo bajas.



Fig. 4.17 Equipo para medir las deformaciones.

Los ensayos se realizaron siguiendo la norma ASTM C 512. Se estudiaron las mezclas M4 C300 GC, y M4 HVFA300 GC, y se fabricaron 7 cilindros de 15 x 30 cm. para cada mezcla, de los cuales 5 cilindros se cargaron en los marcos y 2 se dejaron para determinar la contracción por secado, y por diferencia, determinar la deformación diferida del espécimen cargado.

Se tomaron lecturas en el tiempo, las que se ajustaron con las expresiones para predecir el flujo plástico. En la tabla 4.6 se presentan los resultados ajustados con estas expresiones.

Tabla 4.6 Coeficientes de deformación diferida ajustados.

Edad (días)	M4	
	C	HVFA
7	0.58	0.99
14	0.83	1.28
28	1.14	1.58
90	1.82	2.07
180	2.27	2.30
365	2.72	2.49
$c_u$	4.37	2.96

En la figura 4.18 se muestran los puntos de las mediciones y las expresiones con las que se ajustaron estos datos.

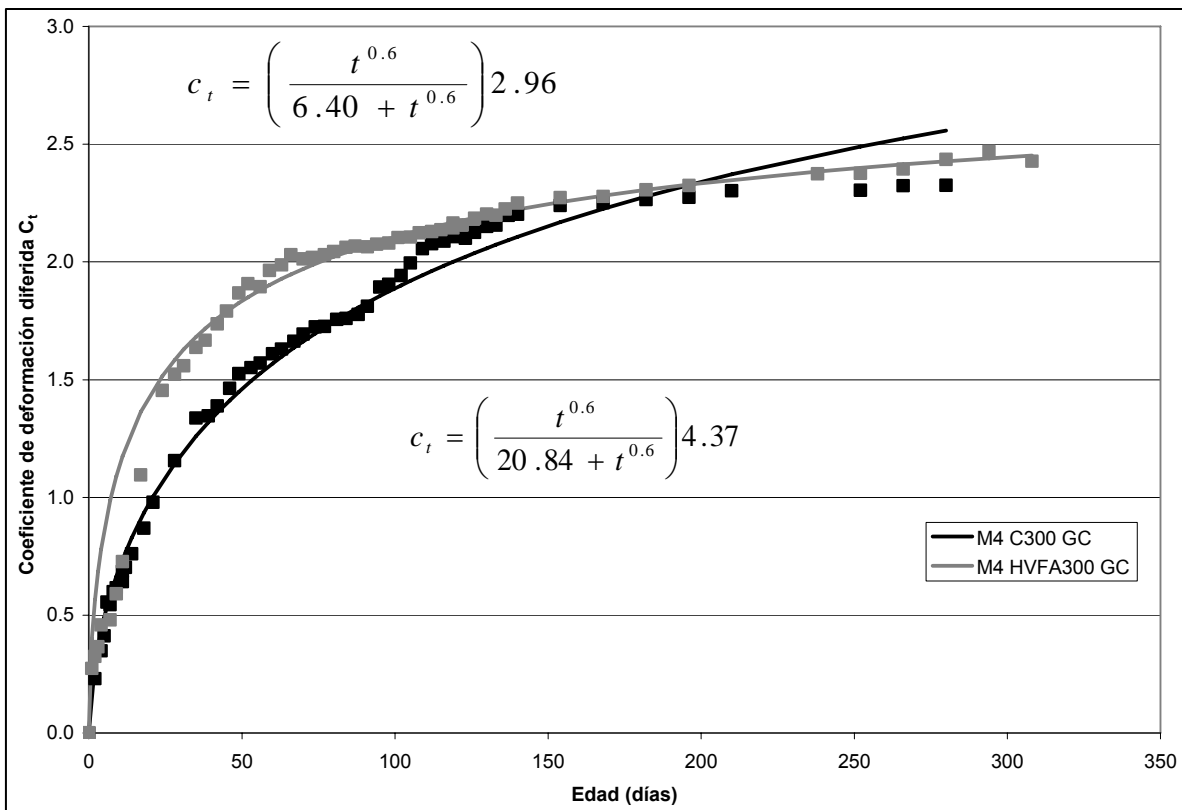


Fig. 4.18 Gráficas de deformación diferida.

#### 4.2.6. Resistencia del concreto a la permeabilidad de los cloruros.

Los cloruros tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa. Hay que tener claro el concepto de que los cloruros no tienen acción directa perjudicial sobre el concreto sino es a través de su participación en el mecanismo de la corrosión de los metales embebidos en el concreto, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados.

Una forma de medir la permeabilidad del concreto a los cloruros es en base a la cantidad de corriente eléctrica que pasa por el material cuando este se sumerge en un medio electrolítico, cloruro de sodio e hidróxido de sodio, y se aplica una diferencia de voltaje entre sus caras.

La permeabilidad esta relacionada con la porosidad, por eso depende de el contenido de agua y la relación  $a/(c+c_v)$  en forma inversa. Es por esto que está ligada a la resistencia a compresión.

Las mezclas de concreto con ceniza volante producen poros más finos en la pasta de cemento hidratada, lo cual disminuye la porosidad y la permeabilidad, por lo tanto el ingreso de los cloruros.

La medición de la resistencia a la permeabilidad de los cloruros se hizo siguiendo la norma ASTM C 1202. Se hicieron ensayos a 28 y 90 días.

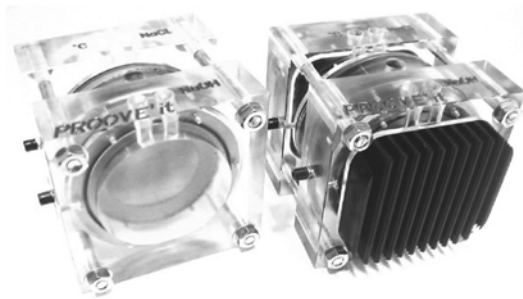


Fig. 4.19 Celdas de medición



Fig.4.20 Equipo durante el ensayo

Para esto se moldearon probetas cilíndricas de 10 x 20 cm., las que se cortaron para obtener muestras de 10 x 5 cm. Estas muestras se prepararon de acuerdo con la norma para dejarlas al vacío, después de esto se colocaron en las celdas de

medición, las que tienen dos depósitos, uno de ellos con una solución de cloruro de sodio al 3% (3.0% NaCl), y el otro con una solución de hidróxido de sodio al 0.3% (0.3% NaOH). Se dejan los especímenes conectados al equipo midiendo la carga total en coulombs que pasa a través de ellos con un voltaje de 60v y un tiempo de 6 horas.

En la tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos a 28 y 90 días.



Tabla 4.7 Resultados de ensayos de resistencia a la permeabilidad de los cloruros, en coulombs.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	5,501	6,955	4,266	6,327	4,777	6,681	2,887	2,905	3,077	3,260	2,512	2,920	2,873	2,164
90	2,959	1,063	2,480	633	3,090	801	1,887	461	1,832	582	1,253	531	1,445	549

Tabla 4.8 Expansiones de ensayos de resistencia al ataque de sulfatos calculadas.

$\epsilon_t \times 10^{-6}$ (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	415	497	377	412	423	492	210	354	255	436	264	316	315	214
14	528	538	473	479	535	543	287	382	341	478	325	342	344	252
21	581	553	517	507	587	562	326	393	383	494	353	352	355	268
28	612	561	542	522	617	572	350	398	409	503	368	357	360	276
56	664	573	585	547	667	588	394	407	455	516	394	365	369	290
91	687	578	604	557	689	594	414	410	475	521	405	368	373	296
105	692	579	608	559	694	595	418	411	480	522	407	369	374	298
$\epsilon_u$	727	586	636	574	727	604	450	416	512	529	423	373	379	306

#### 4.2.7. Resistencia al ataque de sulfatos.

Los sulfatos que atacan el concreto se hallan generalmente en el suelo en contacto con él, en solución en agua. Por lo general son sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio. Cuando se producen ciclos de humedecimiento y secado del concreto, la concentración de los sulfatos puede incrementarse y llegar a causar deterioro.

Los sulfatos tienen dos maneras de reaccionar químicamente con el concreto:

- Los sulfatos reaccionan con el hidróxido de calcio libre, cal hidratada, que se libera durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio (yeso) que tiene propiedades expansivas.
- El yeso reacciona con el aluminato cálcico hidratado para formar sulfoaluminato de calcio (etringita), también con características expansivas. También existe un efecto físico de aumento de volumen y deterioro causado por la cristalización de las sales sulfatadas en los poros del concreto.

Algunas medidas para controlar el ataque de sulfatos consisten principalmente en evitar los ambientes agresivos. También puede controlarse desde el tipo de cemento a emplear, utilizando cementos resistentes a sulfatos tipo II o tipo V, en donde se ha limitado el contenido del aluminato tricálcico entre el 5% y 8%; o los tipo IP o IPM, en donde se ha agregado puzolana, la que al combinarse con la cal libre del cemento reduce la formación de yeso.

Otra forma es controlando la permeabilidad para evitar el ingreso de los sulfatos al concreto, esto se puede hacer a través de un bajo contenido de agua, relación  $a/(c+cv)$  baja y de la calidad y granulometría de los agregados.

En los concretos con ceniza volante se espera tener una mayor resistencia a los sulfatos en comparación con las mezclas de concreto de cemento Pórtland, debido sobre todo a la menor permeabilidad de estos.

Las pruebas de resistencia al ataque de sulfatos se hicieron tomando como base la norma ASTM C 1012 "Cambio de longitud de morteros con cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfato de sodio", modificando las partes en que la norma no cumplía con los objetivos y alcances del estudio. La diferencia principal radica en que la norma es para ensayar morteros, morteros con una relación cemento/arena y agua/cementantes fijas, y los resultados permiten comparar la

resistencia al ataque de sulfatos de los diferentes cementos usados en estos morteros. El objetivo del estudio es comparar las mejoras o cambios que la ceniza volante puede introducir en las propiedades del concreto, esto para diferentes consumos de cementante, por lo que necesitábamos probar las diferentes mezclas (tabla 3.6).



Fig. 4.21 Almacenaje de barras en prueba de resistencia a los sulfatos.

Las probetas utilizadas, a diferencia de la norma, fueron similares a las probetas prismáticas de 7.5 x 7.5 x 25 cm utilizadas para las pruebas de contracción por secado. Las probetas se dejaron en un recipiente de agua con cal dentro del cuarto de curado húmedo, a temperatura y humedad controladas (ASTM C192), durante 28 días, tiempo después del cual pasaron a la cámara de curado en seco. A los 90 días las probetas se introdujeron en la solución de sulfato de sodio al 5%, en donde se quedaron y solo se sacaban para hacer las mediciones. La preparación de la solución de sulfato de sodio, el almacenamiento de las probetas dentro de la solución, la frecuencia y forma de medición se hicieron respetando la norma ASTM C 1012.

Se decidió que la exposición a los sulfatos de las probetas se haría a los 90 días para darle tiempo a la ceniza de reaccionar.

La medición del ataque de los sulfatos se basó en el cambio de longitud de los prismas, que se determinó de acuerdo a la norma ASTM C 490.

En la tabla 4.8 se ven los resultados de los ensayos de resistencia al ataque de sulfatos. La tabla muestra los valores de las expansiones unitarias calculadas luego que se ajustaran los datos de las lecturas con una ecuación de la forma:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{a+t} \right) \varepsilon_u$$

Donde:

- $\varepsilon_t$ : deformación unitaria de expansión a la edad "t".
- t: tiempo.
- a: constante que depende de las características de cada mezcla.
- $\varepsilon_u$ : coeficiente de expansión unitaria última.

En la figura 4.22 se muestran las gráficas de las expansiones de la prueba de resistencia al ataque de sulfatos para las mezclas M3 C300 GA y M3 HVFA300 GA. Los puntos son las lecturas hechas de las probetas a diferentes edades, y las líneas continuas representan la ecuación de ajuste de estas lecturas.

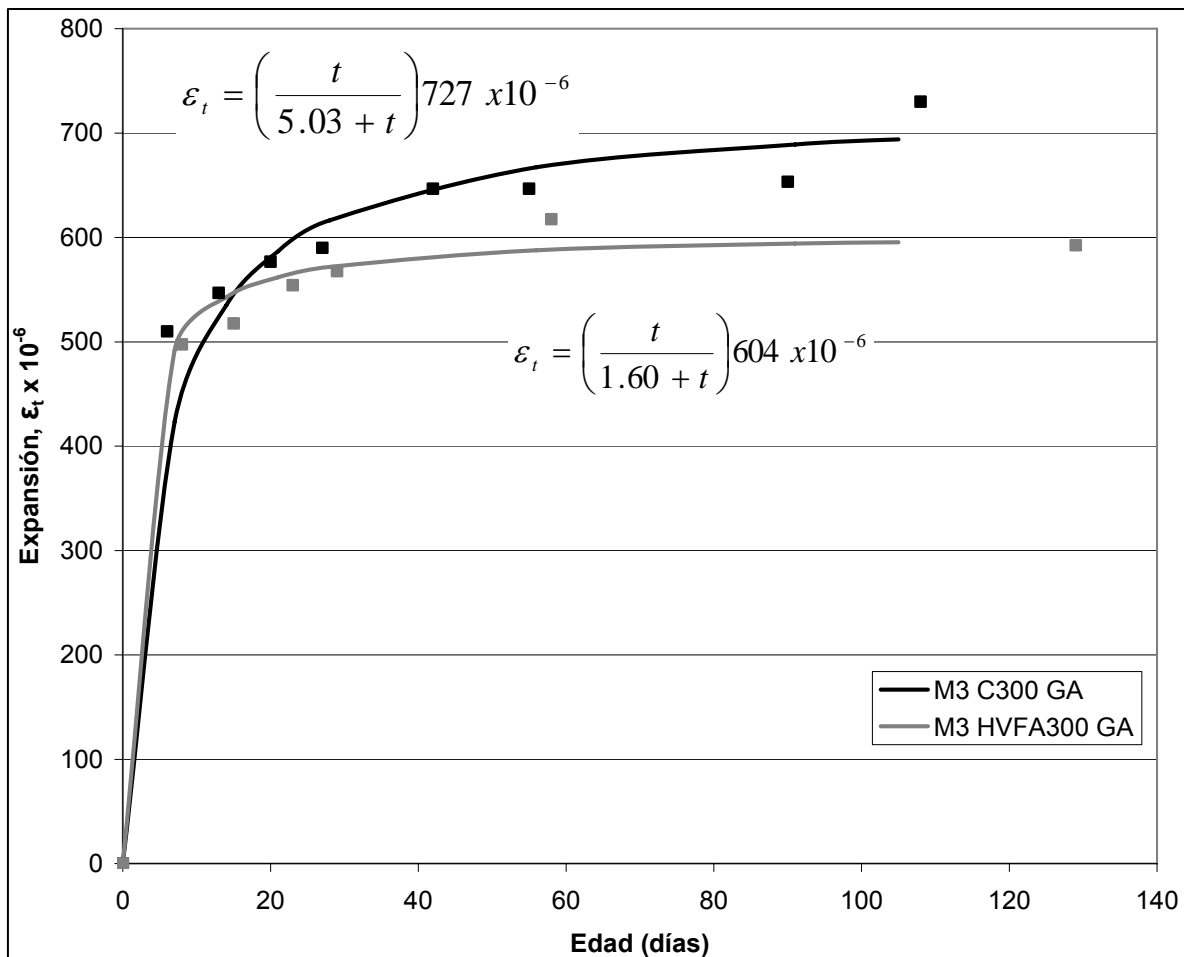


Fig. 4.22 Expansiones debido a la prueba de ataque de sulfatos.

## 5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 5.1. Trabajabilidad.

Se evaluó la trabajabilidad con base en la prueba de revenimiento en el cono de Abrahams, ASTM C 143

En la tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos en esta prueba.

Tabla 5.1 Resultados de la prueba de revenimiento en el cono de Abraham.

Mezcla		Agregado grueso	Contenido de agua	$a/(c+cv)$	Pozzolith 322 N	Glenium 3030 NS	Revenimiento promedio	%	
			L		ml	ml	cm		
M1	C	Andesita	165	0.83	933	0	15	111%	
	HVFA		165	0.83	453	0	17		
M2	C		160	0.64	1100	0	5	119%	
	HVFA		160	0.64	1100	0	6		
M3	C		180	0.60	1000	0	18	77%	
	HVFA		180	0.60	1350	0	14		
M4	C		Caliza	170	0.57	1350	3000	23	95%
	HVFA			170	0.57	1350	3000	22	
M5	C	180		0.51	1575	2500	24	74%	
	HVFA	180		0.51	1575	1000	18		
M6	C	185		0.46	1800	1000	15	53%	
	HVFA	185		0.46	1800	1000	8		
M7	C	185		0.41	2000	3500	22	72%	
	HVFA	185		0.41	2000	3500	16		

Como se ve en la tabla 5.1 cada par de mezclas comparables tienen la misma cantidad de agua y relación  $a/(c+cv)$ , se trató de usar también la misma cantidad de aditivo plastificante y súper plastificante para que los revenimientos puedan ser comparados. Aunque esto no se da en las mezclas M1, M3 y M5.

Según estos resultados no se puede decir que la ceniza volante mejora la trabajabilidad de las mezclas de concreto.

En las mezclas con agregado grueso andesítico se ve que en las mezclas M1 aunque la mezcla con ceniza volante tiene una menor cantidad de aditivo se obtuvo un mayor revenimiento, en las mezclas M2 con iguales cantidades de aditivo se obtuvo un revenimiento mayor para la mezcla con ceniza, en las mezclas M3 la mezcla con ceniza volante tiene mayor cantidad de aditivo y a pesar de esto se obtuvo un menor revenimiento. Aunque en las mezclas M1 y M2 se puede decir que si se obtuvo

mayores revenimientos para las mezclas con ceniza volante, estas diferencias no fueron muy grandes, y esto no se repitió para las mezclas M3, donde las diferencias del revenimiento si fueron mayores, siendo menor el revenimiento para la mezcla de ceniza volante aunque haya tenido mayor cantidad de aditivo.

En las mezclas con agregado grueso calizo se ve que para todos los casos las mezclas con ceniza volante tuvieron menores revenimientos, aunque en las mezclas M5 la mezcla con ceniza volante tuvo menor cantidad de aditivo súper plastificante, por lo que no sería válida esta comparación para estas mezclas.

En general se puede ver que la inclusión de ceniza volante a las mezclas no mejoró la trabajabilidad, por el contrario se obtuvieron menores revenimientos para las mezclas con ceniza volante.

Esto se puede deber a que el reemplazo de cemento pórtland por ceniza volante se hizo en peso, y al tener la ceniza volante una menor densidad que el cemento se tuvo un mayor volumen de cementantes. Este mayor volumen de cementantes se compensó con una disminución de volumen en los agregados en el diseño de mezcla, pero al ser los cementantes más finos que los agregados el área específica aumentó, lo que hizo que aumentara el requerimiento de agua y disminuyera la trabajabilidad para un mismo consumo de agua.

## **5.2. Resistencia a compresión.**

Los resultados de los ensayos a compresión se muestran en la tabla 5.2, en la tabla 5.3 se expresan estos valores como porcentaje de la resistencia alcanzada en la mezcla de control para cada edad; en la tabla 5.4 se expresan los valores obtenidos como porcentaje de la resistencia alcanzada a 28 días en cada mezcla.

En general las resistencias a compresión de las mezclas con ceniza volante son menores a las de su mezcla de control a los 28 días, pero éstas se van acercando con la edad.

Como se ve en la tabla 5.3, en general en las mezclas de ceniza volante con agregado grueso calizo (M4 a M7) se alcanzan valores de resistencia a compresión más altos en comparación con sus mezclas de control que en las mezclas de ceniza volante con agregado andesítico (M1 a M3), esto para todas las edades.

En las mezclas con andesita, las de ceniza volante alcanzan a los 7 días entre el 25% y 40% de la resistencia a compresión de su mezcla de control, y estos porcentajes van

aumentando con la edad, es decir, las resistencias de las mezclas con ceniza volante se van acercando a las resistencias de las mezclas de control, llegando a los 28 días a tener entre el 32% y 49% y a los 90 días entre el 53% y el 70%.

En las mezclas con caliza estos porcentajes son más altos; a los 7 días las resistencias a compresión de las mezclas con ceniza volante alcanzan entre el 47% y el 55% de la resistencia de su mezcla de control, estos valores también van aumentando con la edad llegando a los 28 días entre 57% y 63% y a los 90 días a valores entre el 72% y el 79%.

Tabla 5.2 Resistencias a compresión en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	214	54	321	114	338	142	313	147	357	196	442	226	500	270
14	265	71	379	151	393	177	342	194	407	224	488	279	550	316
28	276	89	421	174	400	196	370	211	438	251	532	326	563	357
90	301	158	474	269	461	322	425	334	462	357	576	418	653	474

Tabla 5.3 Resistencias a compresión expresadas como porcentaje de la mezcla de control para cada edad.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	100.0%	25.1%	100.0%	35.5%	100.0%	42.0%	100.0%	46.9%	100.0%	54.8%	100.0%	51.1%	100.0%	53.9%
14	100.0%	26.9%	100.0%	39.9%	100.0%	44.9%	100.0%	56.6%	100.0%	55.1%	100.0%	57.1%	100.0%	57.4%
28	100.0%	32.4%	100.0%	41.3%	100.0%	49.1%	100.0%	56.8%	100.0%	57.3%	100.0%	61.2%	100.0%	63.4%
90	100.0%	52.4%	100.0%	56.7%	100.0%	70.0%	100.0%	78.6%	100.0%	77.3%	100.0%	72.7%	100.0%	72.5%

Tabla 5.4 Resistencias a compresión expresadas como porcentaje de la resistencia obtenida a 28 días.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	77.5%	60.0%	76.2%	65.5%	84.5%	72.4%	84.4%	69.7%	81.5%	78.0%	83.0%	69.3%	88.9%	75.6%
14	96.1%	79.9%	90.1%	87.1%	98.3%	90.1%	92.3%	91.9%	93.0%	89.5%	91.7%	85.5%	97.7%	88.4%
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	109.2%	176.5%	112.6%	154.7%	115.2%	164.5%	114.8%	158.8%	105.6%	142.4%	108.2%	128.4%	116.1%	132.7%



En la tabla 5.4 se puede ver el desarrollo de la resistencia con el tiempo. En general se observa que las mezclas con ceniza volante siguen desarrollando la resistencia a compresión a edades tardías (90 días), llegando a tener entre 28% y 76% más en comparación con la resistencia a los 28 días, a diferencia de las mezclas de control en donde la ganancia de resistencia a lo 90 días está entre el 6% y el 16%.

En las mezclas con andesita, las mezclas de control tienen una resistencia a los 7 días de entre el 76% y el 86% de la resistencia a 28 días, a los 14 días sube a valores entre 90% y 98% y a los 90 días se obtienen valores entre 109% y 115% de la resistencia a 28 días. Mientras que en las mezclas con ceniza volante a los 7 días alcanzan una resistencia a compresión del 60% al 72% de la resistencia a 28 días, a los 14 días estos valores suben entre el 80% y 90%, y a los 90 días llegan entre el 155% y 177%.

En las mezclas con caliza, las de control alcanzan una resistencia a los 7 días de entre el 82% y el 88% de la resistencia a 28 días, a lo 14 días se llegan a valores de entre 92% y 98% y a los 90 días a valores entre 106% y 116%. En las mezclas con ceniza volante se alcanzan valores a los 7 días de entre el 69% y 78% de la resistencia a 28 días, a los 14 días valores entre el 86% y 92% y a los 90 días valores entre 128% y 159%.

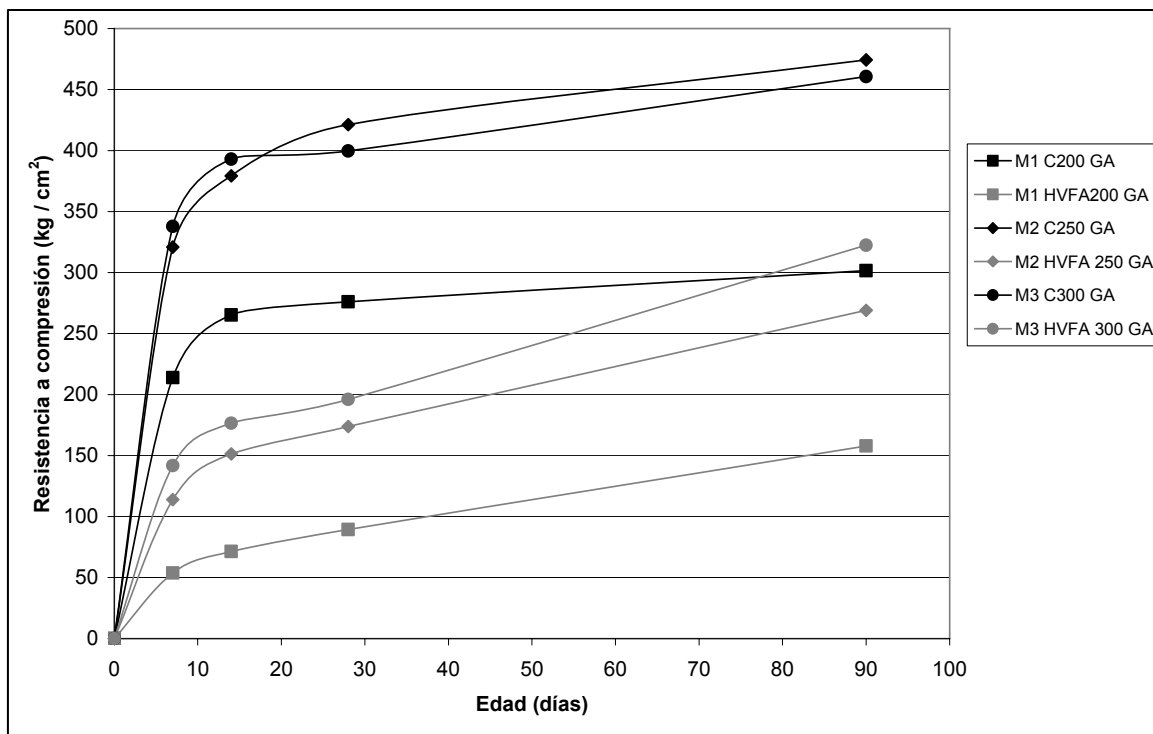


Fig. 5.1 Resistencias a compresión a diferentes edades para mezclas con andesita.

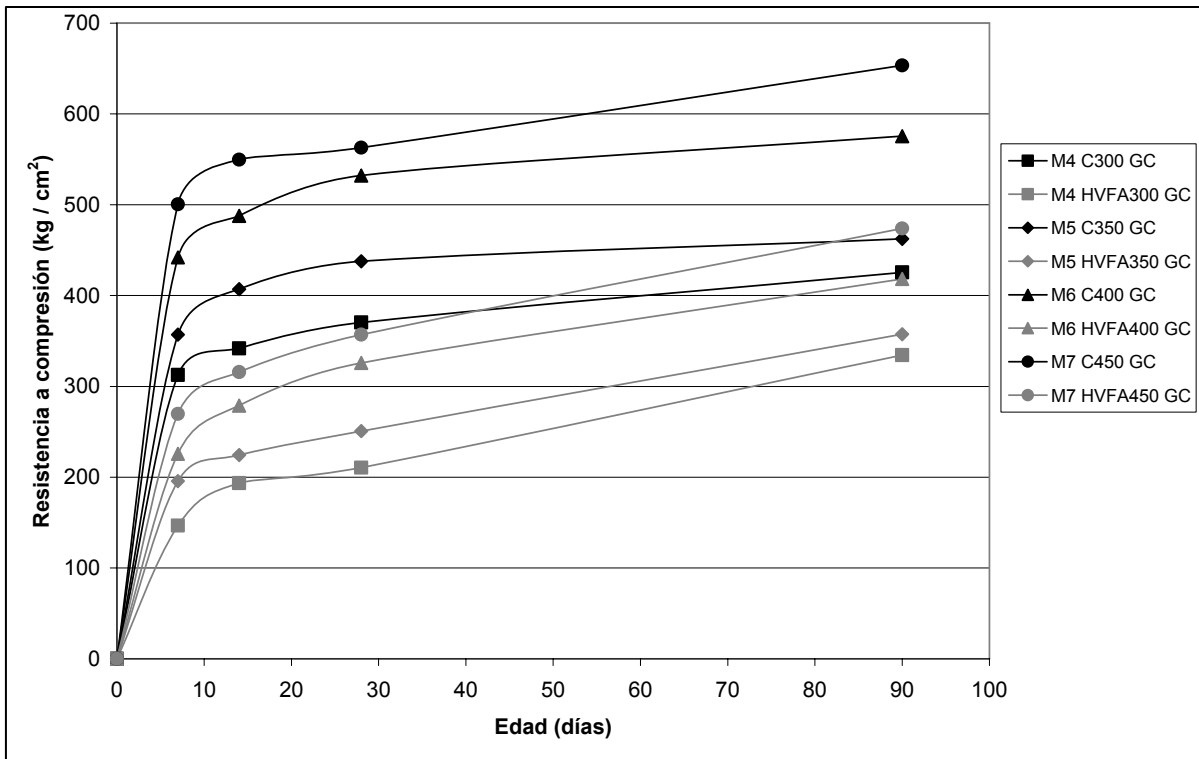


Fig. 5.2 Resistencias a compresión a diferentes edades para mezclas con caliza.

En las gráficas (Figuras 5.1 y 5.2) se ven las curvas de la resistencia a compresión a diferentes edades, en ellas se nota que las resistencias de las mezclas con ceniza volante son menores a las de su mezcla de control, pero las pendientes de estas curvas son mayores para las mezclas con ceniza volante lo que indica una mayor ganancia de resistencia con el tiempo.

En las figuras 5.3 y 5.4 se han graficado las curvas de la resistencia a compresión con el tiempo en proporción de la resistencia obtenida a 28 días. En ellas se ve que el desarrollo de la resistencia a compresión es lenta en las mezclas con ceniza volante en comparación con las mezclas de control, pues se tiene menores valores a edades tempranas, 7 y 14 días. Pero a edades tardías, 90 días, se tiene una importante ganancia de resistencia, esto se ve en las mayores pendientes para las curvas con ceniza volante en comparación con sus mezclas de control.

La ganancia de resistencia a edades tardías es mayor para las mezclas de ceniza volante con andesita, que en las mezclas con caliza, esto se ve en la mayor pendiente de estas curvas.

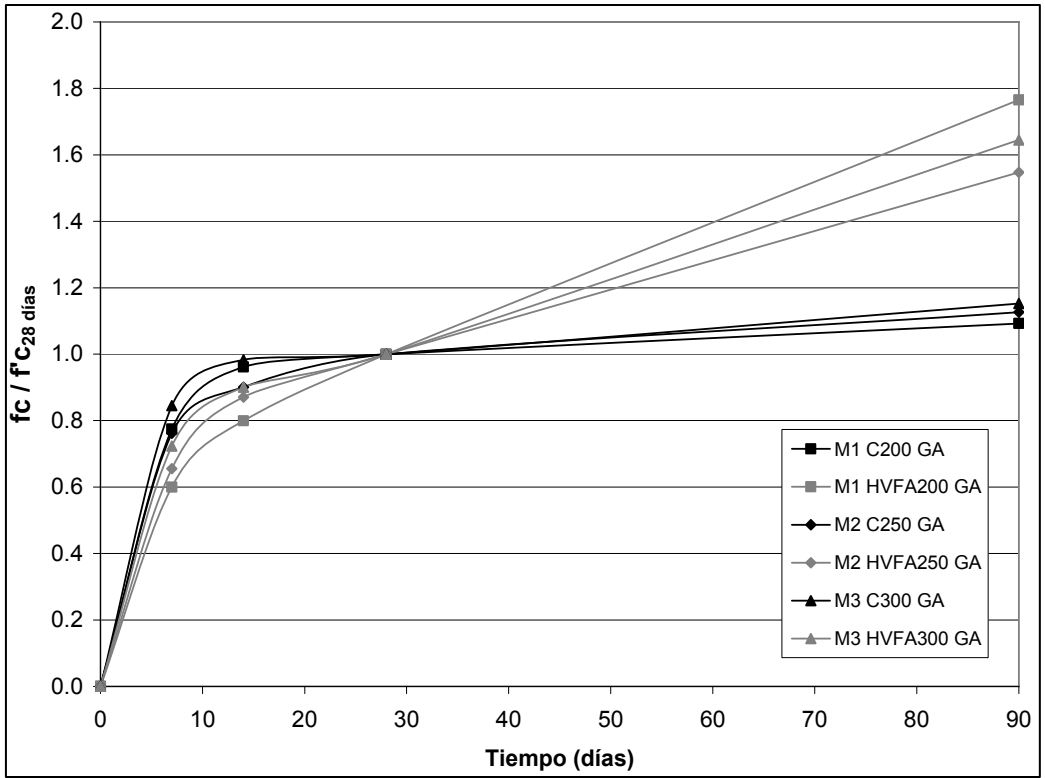


Fig. 5.3 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en mezclas con andesita.

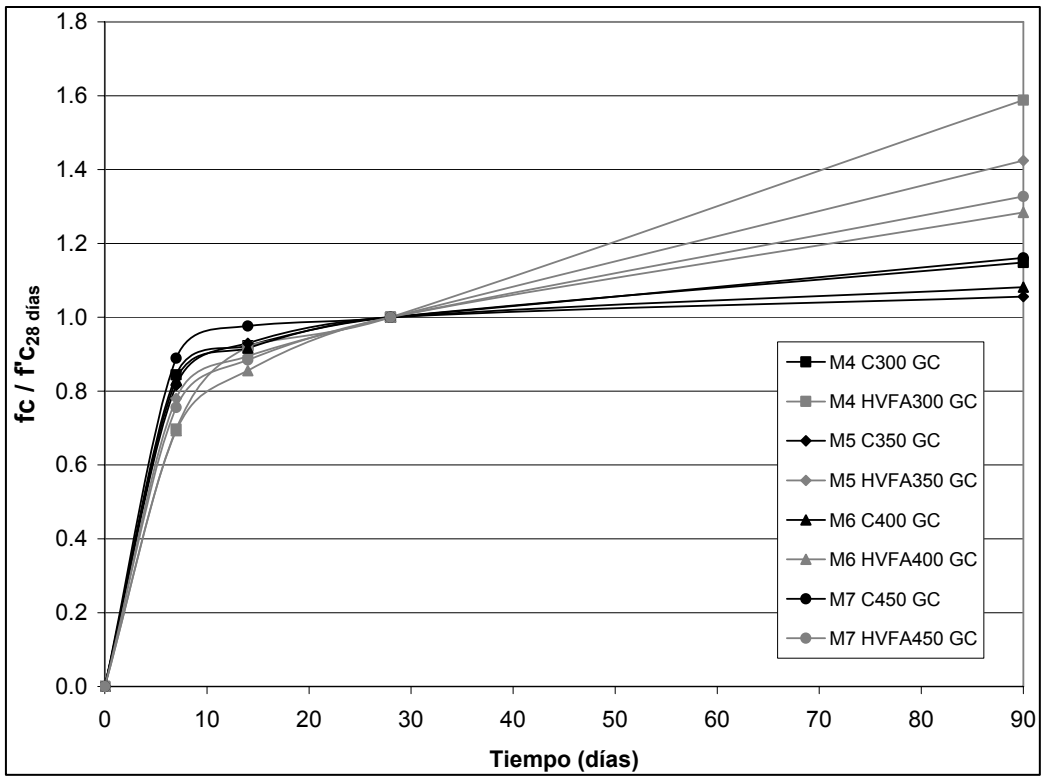


Fig. 5.4 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en mezclas con caliza.

Con estos valores se encontraron las expresiones para estimar la resistencia a compresión del concreto a cualquier edad a partir de la resistencia a los 28 días, dependiendo del tipo de agregado grueso y de los cementantes utilizados.

Tabla 5.5 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en las mezclas de control con agregado andesítico.

<b>Edad</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>Promedio</b>
<b>(días)</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	
7	77.5%	76.2%	84.5%	79.4%
14	96.1%	90.1%	98.3%	94.8%
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	109.2%	112.6%	115.2%	112.4%

Tabla 5.6 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en las mezclas de ceniza volante con agregado andesítico.

<b>Edad</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>Promedio</b>
<b>(días)</b>	<b>HVFA</b>	<b>HVFA</b>	<b>HVFA</b>	
7	60.0%	65.5%	72.4%	66.0%
14	79.9%	87.1%	90.1%	85.7%
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	176.5%	154.7%	164.5%	165.2%

Tabla 5.7 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en las mezclas de control con agregado calizo.

<b>Edad</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>Promedio</b>
<b>(días)</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	
7	84.4%	81.5%	83.0%	88.9%	84.5%
14	92.3%	93.0%	91.7%	97.7%	93.6%
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	114.8%	105.6%	108.2%	116.1%	111.2%

Tabla 5.8 Proporción de la resistencia a compresión a 28 días en las mezclas de ceniza volante con agregado calizo.

<b>Edad</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>Promedio</b>
<b>(días)</b>	<b>HVFA</b>	<b>HVFA</b>	<b>HVFA</b>	<b>HVFA</b>	
7	69.7%	78.0%	69.3%	75.6%	73.1%
14	91.9%	89.5%	85.5%	88.4%	88.8%
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	158.8%	142.4%	128.4%	132.7%	140.6%

En las tablas 5.5 a 5.8 se muestran las proporciones de la resistencia a 28 días obtenidas para los diferentes grupos de mezclas y sus promedios, con los que se calcularon las expresiones para predecir la resistencia del concreto a diferentes edades.

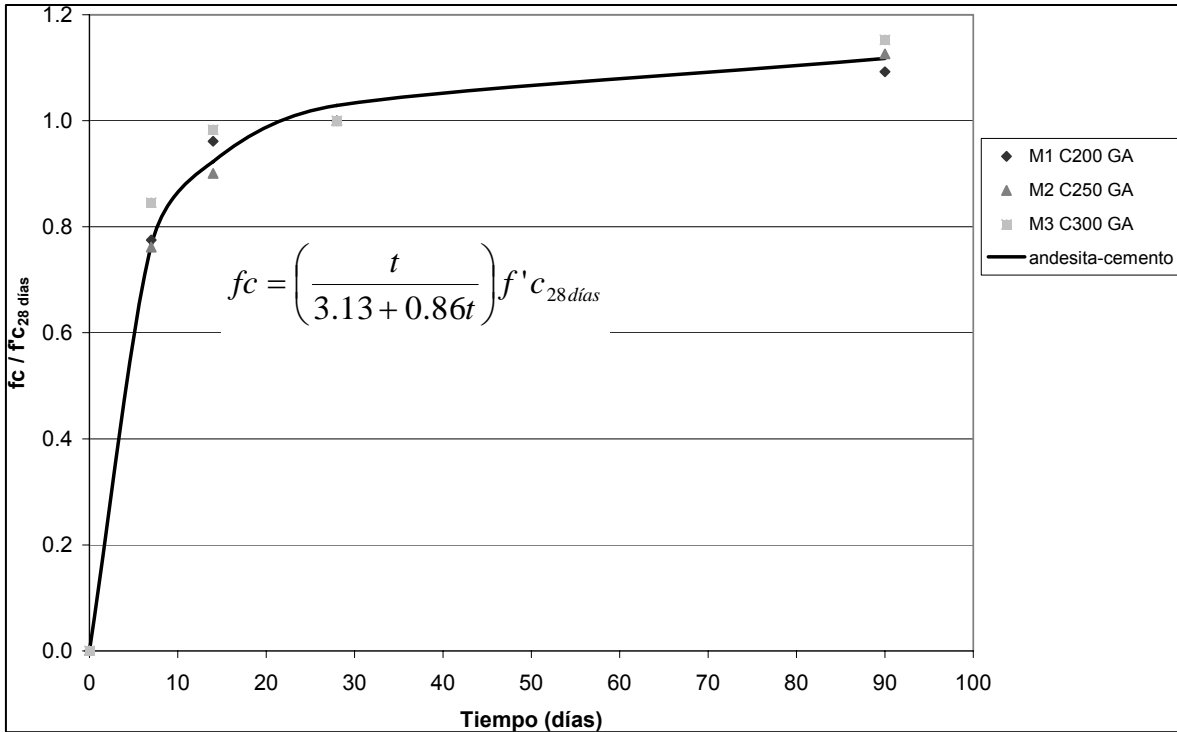


Fig. 5.5 Expresión para estimar la resistencia a compresión en las mezclas de control con andesita.

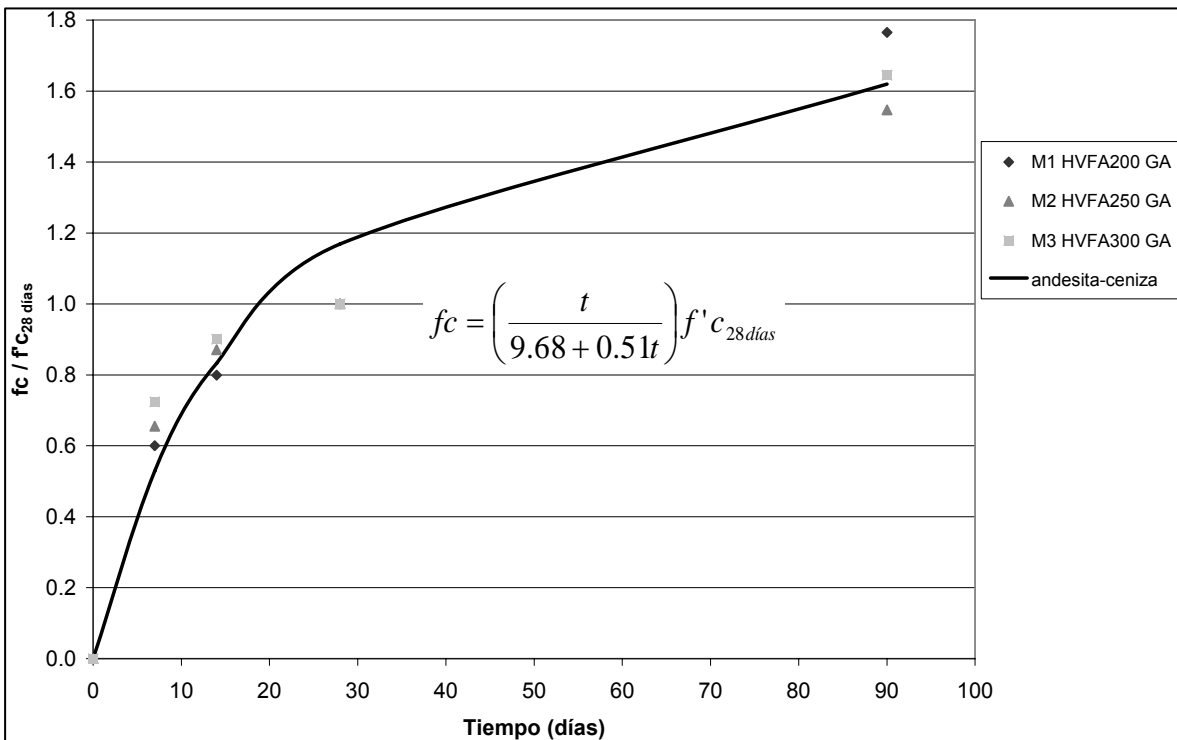


Fig. 5.6 Expresión para estimar la resistencia a compresión en las mezclas de ceniza con andesita.

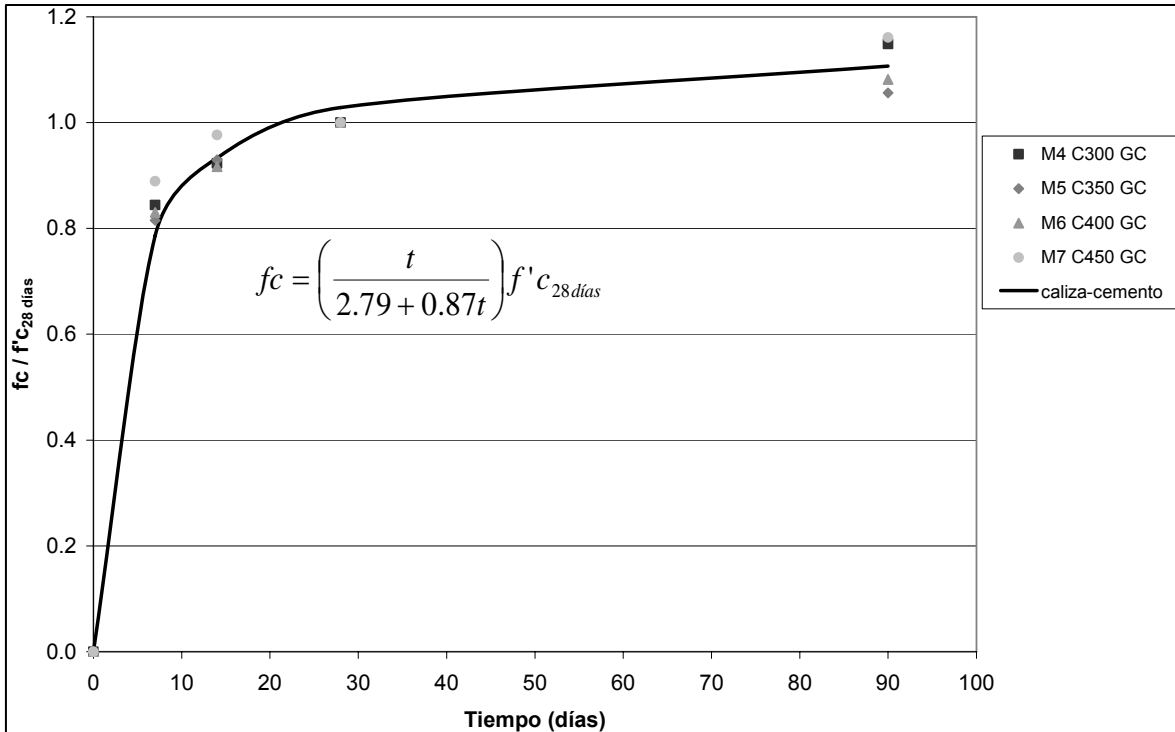


Fig. 5.7 Expresión para estimar la resistencia a compresión en las mezclas de control con caliza.

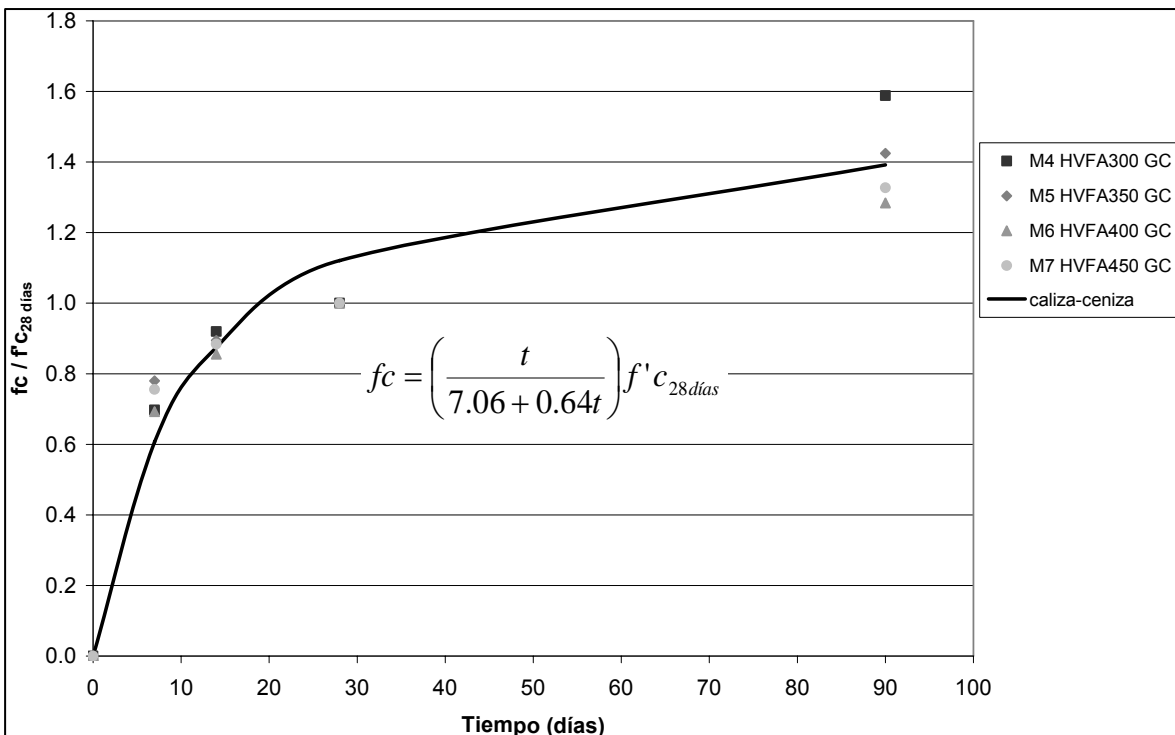


Fig. 5.8 Expresión para estimar la resistencia a compresión en las mezclas de ceniza con caliza.

Estas curvas (Fig. 5.5, a 5.8) se han construido usando los datos de las tablas 5.5 a 5.8, para 7, 14, 28 y 90 días. Las mezclas de control, ambas, las de andesita y caliza, presentan un coeficiente de correlación alto de 0.9997, las mezclas con ceniza volante presentan coeficientes de correlación menores, la de andesita 0.9782, y la de caliza 0.9924. Aunque los coeficientes de correlación de las mezclas con ceniza volante son aún altos, si no se consideran los datos a 90 días, este coeficiente llega a un valor de 1.0, para ambos casos.

Estas expresiones se utilizan para estimar las resistencias de mezclas de concreto de cemento pórtland, y a los 90 días en las mezclas con ceniza volante el mecanismo de ganancia de resistencia del concreto incluye la contribución del cemento y de la ceniza que ya empezó a reaccionar. Con esto se puede explicar este menor grado de correlación cuando se consideran los datos a 90 días. A los 28 días el efecto de ganancia de resistencia es debido principalmente al cemento, y a los 90 días se incluye además el efecto de la ceniza volante.

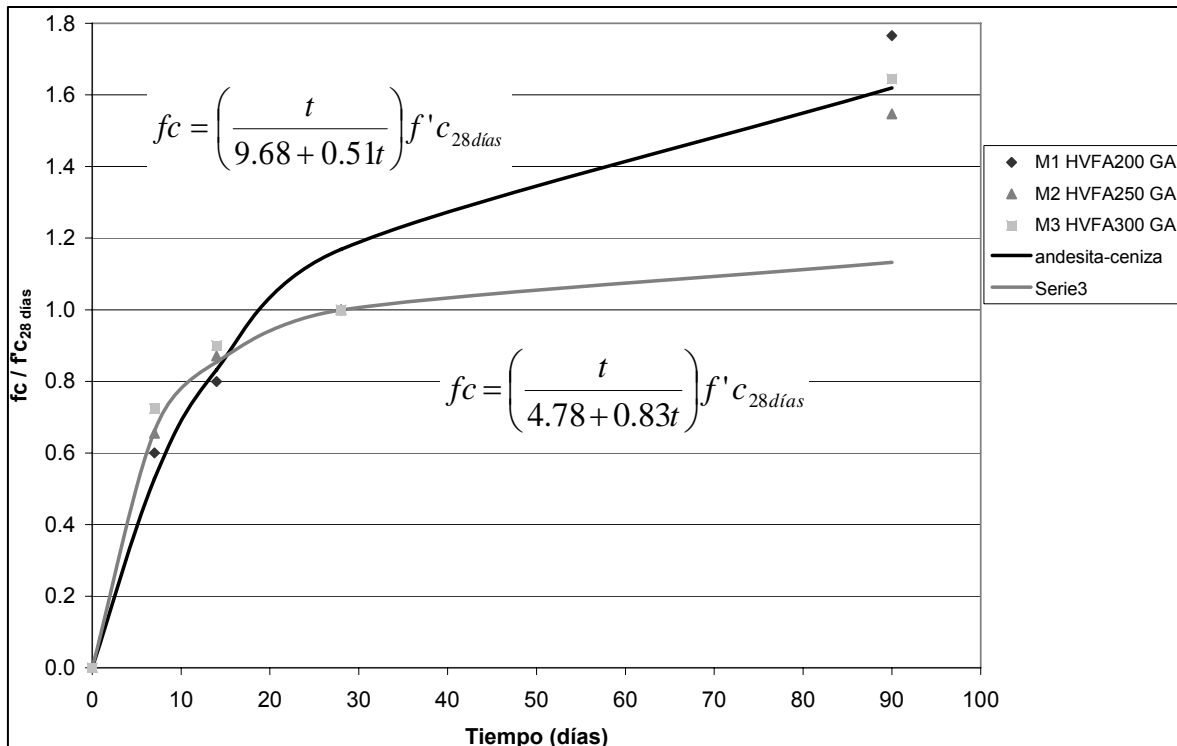


Fig. 5.9 Efecto de la ceniza en la resistencia en mezclas con andesita.

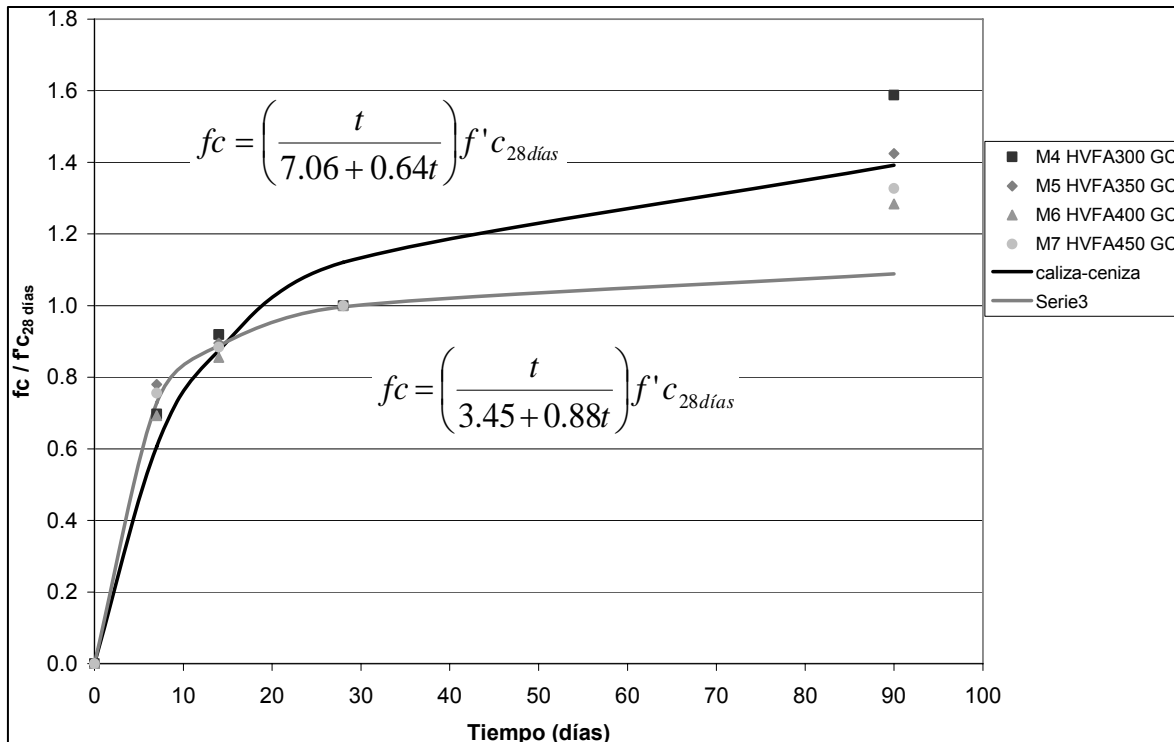


Fig. 5.10 Efecto de la ceniza en la resistencia en mezclas con caliza.

En estas figuras 5.9 y 5.10 se comparan las expresiones que incluyen sólo los datos hasta los 28 días (línea gris), en donde se considera que la ganancia de resistencia es principalmente debida al cemento, y las expresiones que también incluyen los datos a 90 días (línea negra), que son las mismas de las figuras 5.6 y 5.8, se considera que la ganancia de resistencia también incluye el efecto de la ceniza volante que ha reaccionado. La diferencia entre ambas curvas es el aporte de la ceniza volante a la resistencia.

Con las expresiones calculadas, y tomando dos pares de mezclas como ejemplo, uno con agregado andesítico y el otro calizo, se estimaron las resistencias a compresión en el tiempo, los valores calculados se muestran en las tablas 5.9 y 5.10.

Los valores se calcularon usando la resistencia a 28 días de estas mezclas y las expresiones encontradas. En las tablas también se muestran los porcentajes que las resistencias de las mezclas con ceniza alcanzan con relación a sus mezclas de control para las mismas edades. Se ve que en la mezcla M2 de andesita, la mezcla de ceniza volante alcanza el 67% de la resistencia de la mezcla de control a los 360 días, mientras que en la mezcla M6 de caliza, la mezcla de ceniza volante alcanza el 82% de la resistencia de su mezcla de control.



Tabla 5.9 Resistencias calculadas en el tiempo para las mezclas M2 con andesita.

<b>M2</b>	<b>Edad</b>	<b>Resistencia a compresión promedio</b>	<b>fc / f'c<sub>28 días</sub></b>	<b>fc calculado</b>	
	<b>(días)</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>		<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
M2 C250 GA	0	0.00	0.00	0.00	
	7	321	1.16	322	
	14	379	1.37	389	
	28	421	1.53	433	
	90	474	1.72	471	
	120			475	
	240			482	
	360			485	
M2 HVFA250 GA	0	0.00	0.00	0.00	
	7	114	1.27	92	28.5%
	14	151	1.69	145	37.2%
	28	174	1.94	203	46.9%
	90	269	3.01	281	59.8%
	120			294	61.9%
	240			316	65.5%
	360			324	66.8%

Tabla 5.10 Resistencias calculadas en el tiempo para las mezclas M6 con caliza.

<b>M6</b>	<b>Edad</b>	<b>Resistencia a compresión promedio</b>	<b>fc / f'c<sub>28 días</sub></b>	<b>fc calculado</b>	
	<b>(días)</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>		<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
M6 C400 GC	0	0.00	0.00	0.00	
	7	442	1.19	419	
	14	488	1.32	497	
	28	532	1.44	547	
	90	576	1.55	589	
	120			594	
	240			602	
	360			605	
M6 HVFA400 GC	0	0.00	0.00	0.00	
	7	226	1.07	198	47.2%
	14	279	1.32	285	57.4%
	28	326	1.55	365	66.7%
	90	418	1.99	454	77.0%
	120			466	78.5%
	240			487	80.9%
	360			494	81.7%

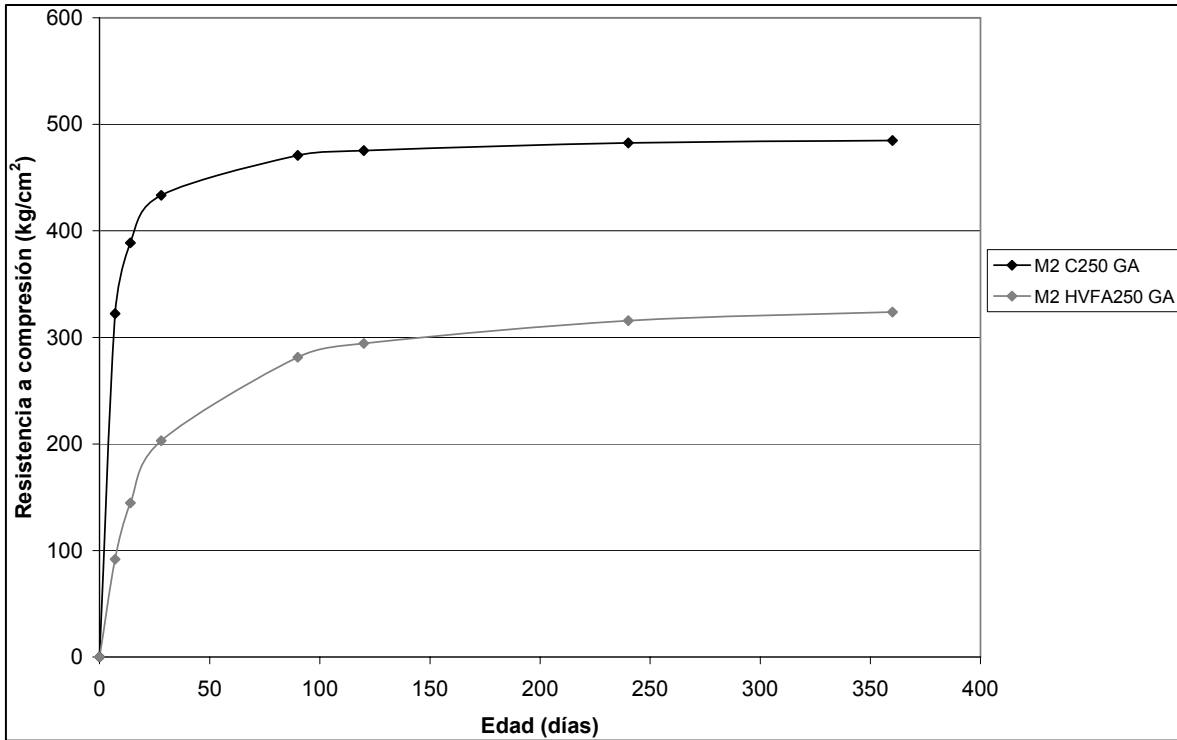


Fig. 5.11 Resistencias calculadas para las mezclas M2 con andesita.

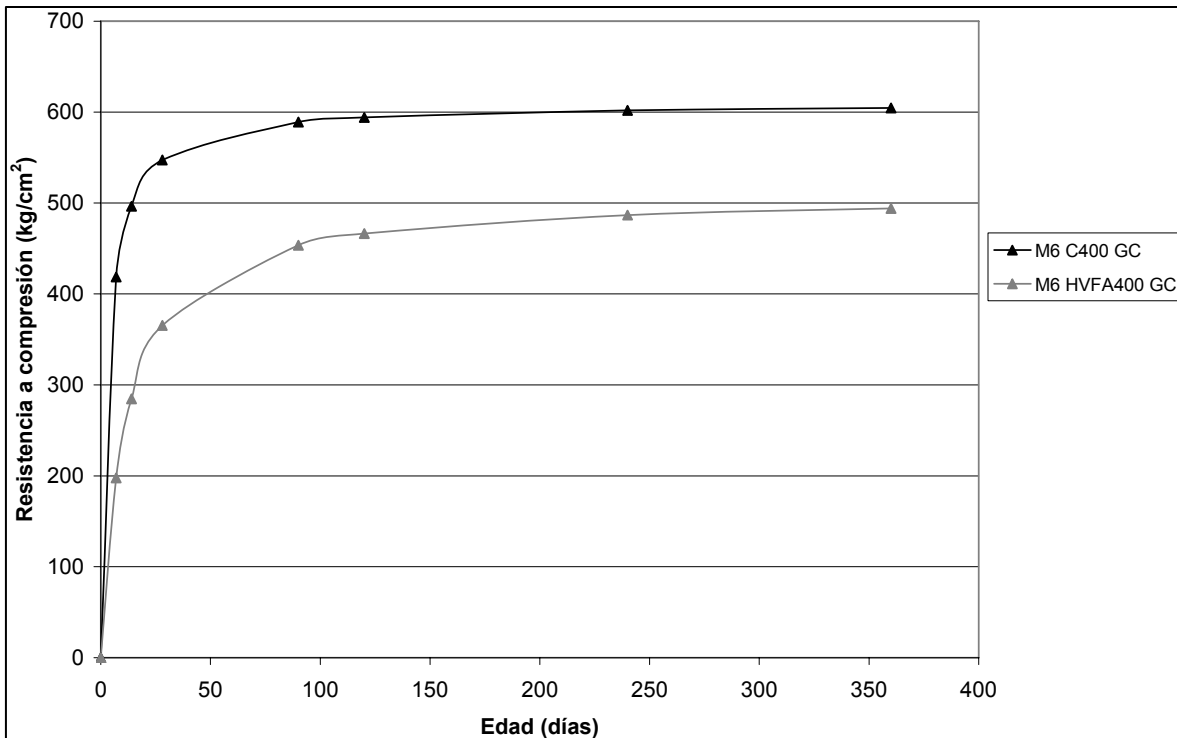


Fig. 5.12 Resistencias calculadas para las mezclas M6 con caliza.

En las figuras 5.11 y 5.12 se ve que las curvas de las mezclas de control ya llegaron a ser horizontales, por lo que no seguirán ganando resistencia, mientras que las mezclas con ceniza volante aún tienen una pequeña pendiente, por lo que la resistencia seguirá aumentando y acercándose a las de su mezcla de control, lo que hará que el porcentaje de las tablas 5.9 y 5.10 suba un poco más con el tiempo.

### 5.3. Relación $a/(c+cv)$ - resistencia a compresión.

La relación  $a/(c+cv)$ , agua / (cemento + ceniza volante), es un parámetro importante en la resistencia a compresión.

Con los resultados obtenidos se elaboró la tabla 5.11 y las curvas resistencia a compresión vs.  $a/(c+cv)$  para 28 y 90 días, figuras 5.13 y 5.14, respectivamente.

Tabla 5.11 Resistencia a compresión vs.  $a/(c+cv)$ .

Agregado	Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Resistencia a compresión	
				28 días kg /cm <sup>2</sup>	90 días kg /cm <sup>2</sup>
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	0.83	276	301
		M2 C250 GA	0.64	421	474
		M3 C300 GA	0.60	400	461
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	0.83	89	158
		M2 HVFA250 GA	0.64	174	269
		M3 HVFA300 GA	0.60	196	322
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	0.57	370	425
		M5 C350 GC	0.51	438	462
		M6 C400 GC	0.46	532	576
		M7 C450 GC	0.41	563	653
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	0.57	211	334
		M5 HVFA350 GC	0.51	251	357
		M6 HVFA400 GC	0.46	326	418
		M7 HVFA450 GC	0.41	357	474

Lo usual es hacer esta curva para la edad de 28 días en los concretos con cemento pórtland, pero como se ve que en los concretos con ceniza volante a la edad de 90 días aún se sigue incrementando la resistencia de una manera considerable, se decidió hacer esta curva para esta edad.

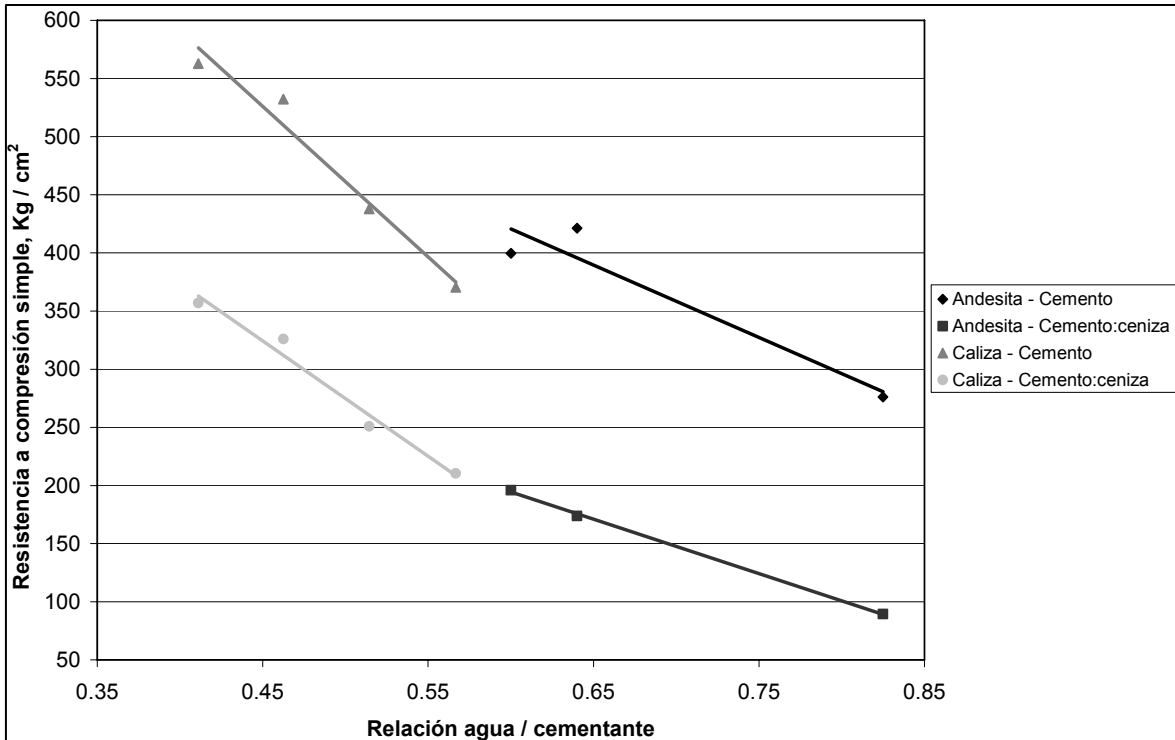


Fig. 5.13 Resistencia a compresión vs.  $a/(c+cv)$  a 28 días.

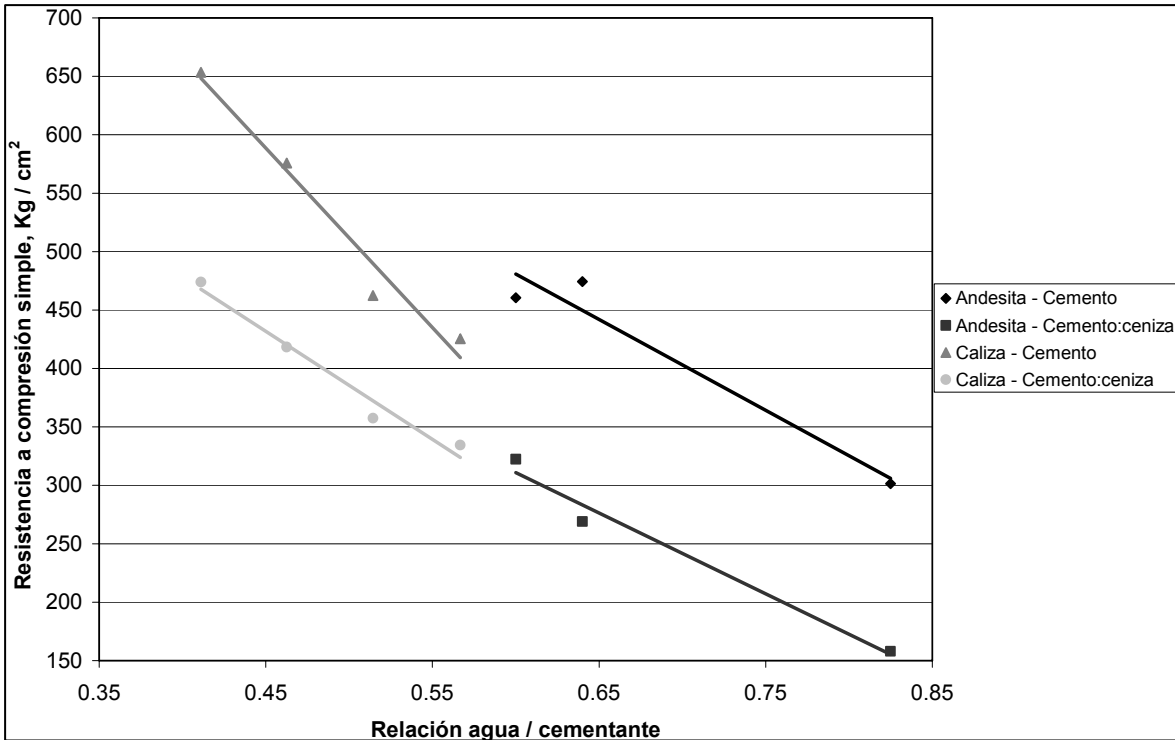


Fig. 5.14 Resistencia a compresión vs.  $a/(c+cv)$  a 90 días.

En ambas gráficas se ve una continuidad en las mezclas con ceniza volante, la de andesita y la de caliza, por lo que pudiera haberse hecho una sola curva para estos puntos. En el caso de las mezclas de control se ve una discontinuidad en los puntos centrales. Como era de esperarse se ve que en las curvas a 90 días los valores de las mezclas con ceniza volante se acercaron a los de la mezcla de control en comparación con las curvas a 28 días.

#### **5.4. Resistencia a la tensión indirecta.**

Los resultados obtenidos en las pruebas de tensión indirecta por compresión diametral se muestran en la tabla 5.12, en la tabla 5.13 se han expresado estos valores como un porcentaje de la mezcla de control para cada edad y en la tabla 5.14 se han expresado los valores de la resistencia como un porcentaje de la resistencia alcanzada a 28 días para cada mezcla.

En la tabla 5.12 se ve que las resistencias a tensión aumentan con la edad tanto en las mezclas de control como en las mezclas con ceniza volante, esto era de esperarse ya que la resistencia a tensión esta muy ligada a la resistencia a compresión y ésta aumenta con la edad. Las resistencias a tensión de las mezclas con ceniza volante son menores a las de su mezcla de control, tanto en las mezclas con andesita como en las mezclas con caliza. Estas también aumentan con la edad, son mayores a los 90 días que a los 28 días, pero a esa edad tampoco llegan a superar a las de su mezcla de control; esto también se puede explicar si se considera la relación que existe entre las resistencias a tensión y compresión.

En la tabla 5.13 se puede ver que en general el porcentaje de la resistencia a tensión respecto a la mezcla de control aumenta con la edad, es decir que la resistencia a tensión de las mezclas de ceniza volante se va acercando a las de su mezcla de control. En las mezclas con andesita, a los 28 días las resistencias de las mezclas con ceniza volante están entre el 46% y 71% de las resistencias de sus mezclas de control, y a los 90 días estos porcentajes suben para estar entre el 65% y el 76%. En las mezclas con caliza, a los 28 días las mezclas con ceniza volante alcanzan entre el 64% y 69% de la resistencia a tensión de su mezcla de control, y a los 90 días entre el 61% y 82%. El único caso en que este porcentaje disminuye es en la mezcla M6, en donde a los 28 días la mezcla de ceniza volante tiene una resistencia a tensión del 62% de la de su mezcla de control y a los 90 días pasa a tener el 61%.

Tabla 5.12 Resistencias a tensión indirecta en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	20.5	9.4	29.1	14.6	23.6	16.7	30.8	20.0	33.4	23.0	42.1	26.0	41.8	26.9
90	25.0	16.1	30.8	22.0	31.8	24.1	34.0	28.0	41.4	30.3	45.5	27.9	43.3	30.8

Tabla 5.13 Resistencias a tensión expresadas como porcentaje de la mezcla de control para cada edad.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	46.0%	100.0%	50.1%	100.0%	70.7%	100.0%	64.9%	100.0%	68.8%	100.0%	61.8%	100.0%	64.3%
90	100.0%	64.5%	100.0%	71.4%	100.0%	75.7%	100.0%	82.2%	100.0%	73.1%	100.0%	61.3%	100.0%	71.2%

Tabla 5.14 Resistencias a tensión expresadas como porcentaje de la resistencia alcanzada a los 28 días.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	121.4%	170.4%	106.2%	151.3%	134.9%	144.3%	110.6%	140.1%	124.1%	131.9%	108.0%	107.2%	103.4%	114.5%

En la tabla 5.14 se ve en general que las mezclas con ceniza volante tienen una mayor ganancia de resistencia a tensión en el tiempo que sus mezclas de control, y esta ganancia es mayor para las mezclas con agregado andesítico.

En las mezclas con andesita, las mezclas de control alcanzan a los 90 días resistencias a tensión de entre 106% y 134% de la resistencia obtenida a los 28 días, mientras que las mezclas con ceniza volante alcanzan a los 90 días resistencias a tensión de entre 144% y 170% de la resistencia a 28 días. En las mezclas con caliza, las mezclas de control alcanzan a los 90 días resistencias a tensión de entre el 103% y 124% de la resistencia obtenida a los 28 días, en las mezclas con ceniza volante se alcanzan resistencias a tensión de entre el 107% y 140% de la resistencia obtenida a 28 días. La mezcla M6 es el único caso en donde la ganancia de resistencia en el tiempo es mayor para la mezcla de control que para la mezcla con ceniza volante, en la mezcla de control la resistencia a tensión a los 90 días es el 108% de la resistencia obtenida a 28 días, mientras que en la mezcla con ceniza volante la resistencia a 90 días es el 107% de la resistencia a tensión a 28 días.

En las tablas 5.15 a 5.18 se relacionan la resistencia a tensión con la resistencia a compresión.

Tabla 5.15 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con andesita.

Mezcla			Compresión $f'_c$		Tensión $f_t$		$f_t / \sqrt{f'_c}$	
			28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	276	301	21	25	1.24	1.44
		M2 C250 GA	421	474	29	31	1.42	1.42
		M3 C300 GA	400	461	24	32	1.18	1.48
promedio							1.28	1.45

Tabla 5.16 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza volante con andesita.

Mezcla			Compresión $f'_c$		Tensión $f_t$		$f_t / \sqrt{f'_c}$	
			28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	89.43	157.88	9.45	16.10	1.00	1.28
		M2 HVFA250 GA	173.81	268.93	14.56	22.04	1.10	1.34
		M3 HVFA300 GA	196.03	322.41	16.69	24.09	1.19	1.34
promedio							1.10	1.32

Tabla 5.17 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con caliza.

Mezcla			Compresión $f'_c$		Tensión $f_t$		$f_t / \sqrt{f'_c}$	
			28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	370.50	425.44	30.75	34.00	1.60	1.65
		M5 C350 GC	437.84	462.34	33.37	41.42	1.59	1.93
		M6 C400 GC	532.27	575.70	42.10	45.48	1.82	1.90
		M7 C450 GC	562.84	653.46	41.84	43.26	1.76	1.69
promedio							1.70	1.79

Tabla 5.18 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza volante con caliza.

Mezcla			Compresión $f'_c$		Tensión $f_t$		$f_t / \sqrt{f'_c}$	
			28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	210.54	334.35	19.96	27.95	1.38	1.53
		M5 HVFA350 GC	250.87	357.32	22.95	30.27	1.45	1.60
		M6 HVFA400 GC	325.88	418.38	26.03	27.89	1.44	1.36
		M7 HVFA450 GC	357.01	473.86	26.90	30.80	1.42	1.41
promedio							1.42	1.48

Con los datos de las tablas 5.15 a 5.18 se construyeron las curvas que muestran esta relación para 28 y 90 días (figuras 5.15 a 5.18).

En la tabla 5.19 se ha hecho un resumen de las relaciones obtenidas entre la resistencia a tensión y la resistencia a compresión para las mezclas según el tipo de agregado y cementantes usados.

Tabla 5.19 Relaciones entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$

Mezcla		$f_t / \sqrt{f'_c}$		Porcentaje con respecto a la mezcla de control		Porcentaje con respecto a 28 días	
		28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
				%	%	%	%
Andesita	Cemento	1.28	1.45	100.0%	100.0%	100.0%	113.2%
Andesita	Cemento - Ceniza	1.10	1.32	86.0%	91.5%	100.0%	120.4%
Caliza	Cemento	1.70	1.79	100.0%	100.0%	100.0%	105.6%
Caliza	Cemento - Ceniza	1.42	1.48	83.9%	82.5%	100.0%	103.8%



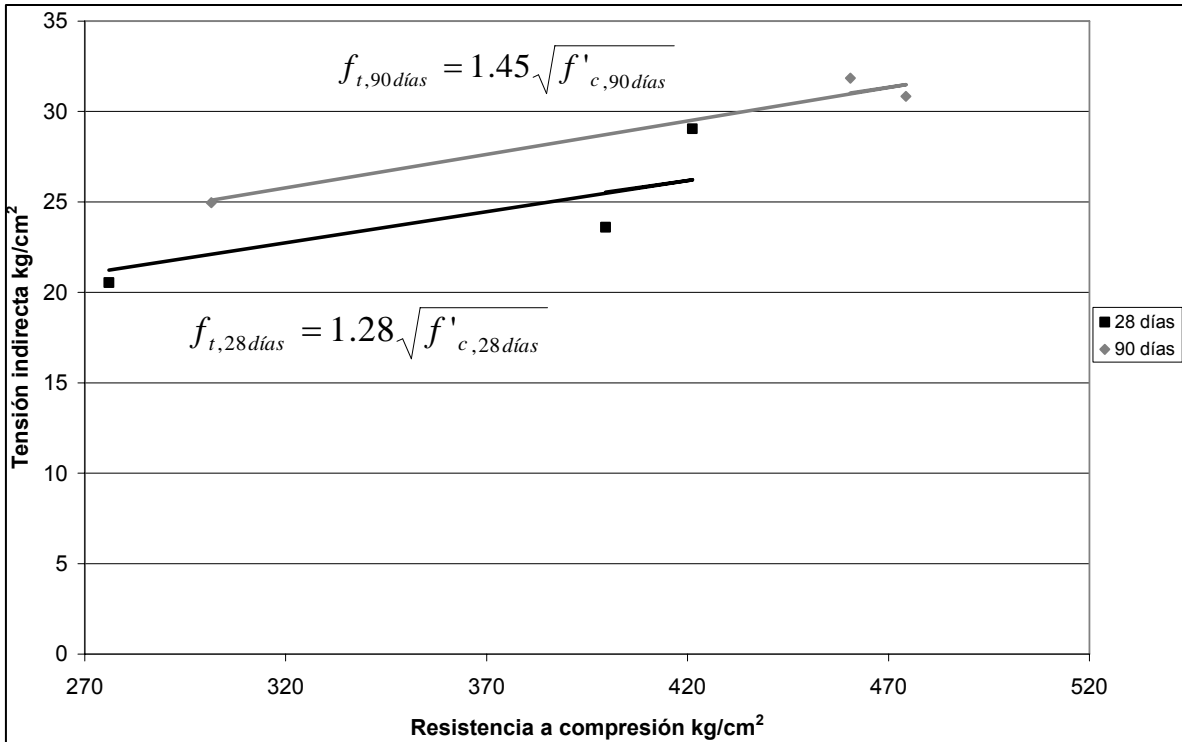


Fig. 5.15 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con andesita a 28 y 90 días.

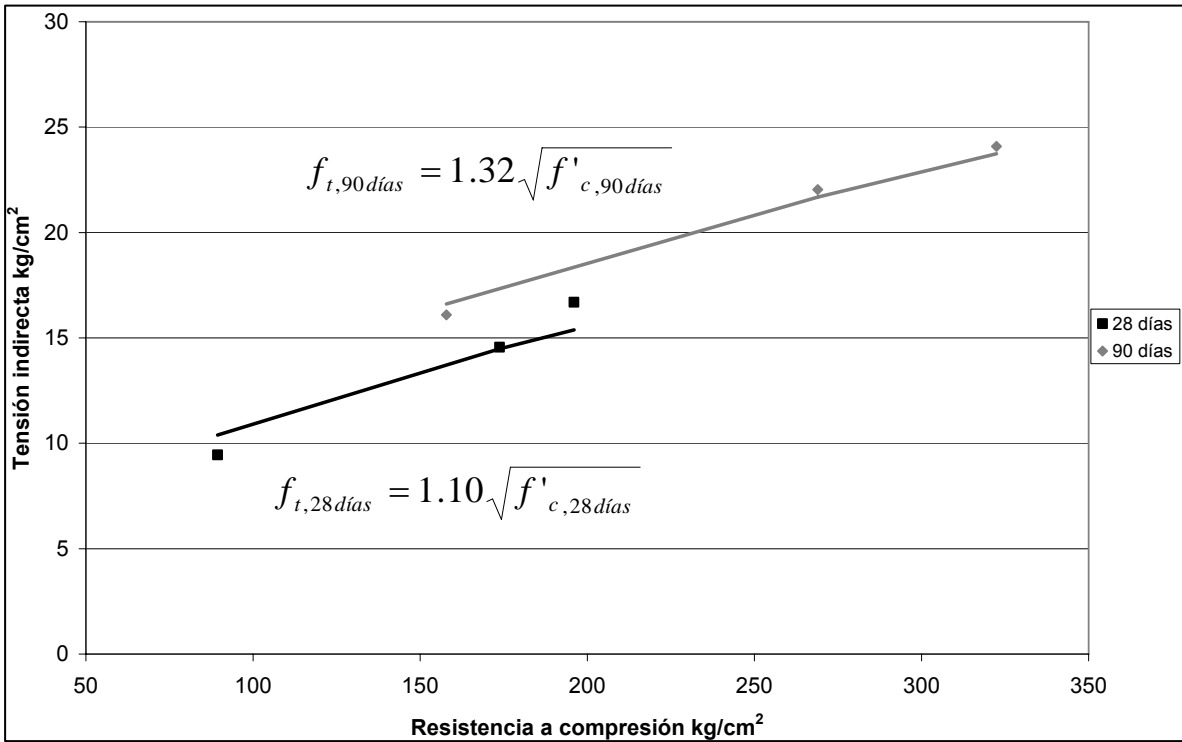


Fig. 5.16 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza volante con andesita a 28 y 90 días.

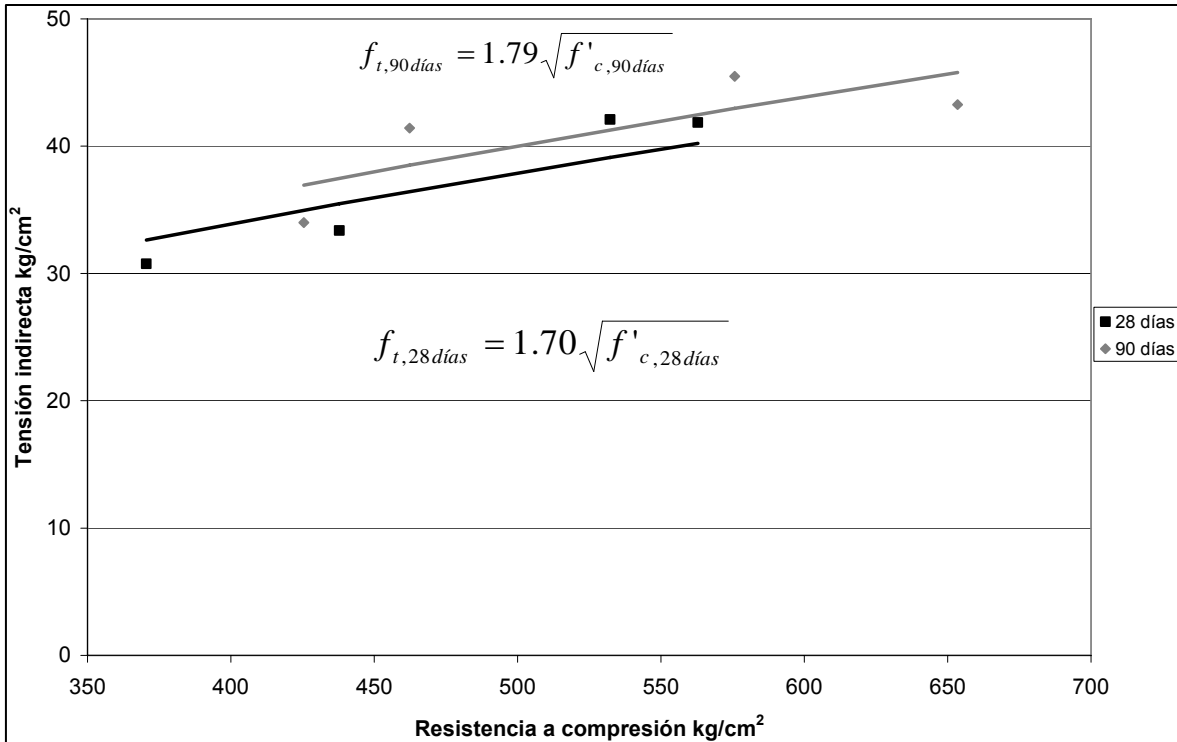


Fig. 5.17 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'c}$  para las mezclas de control con caliza a 28 y 90 días.

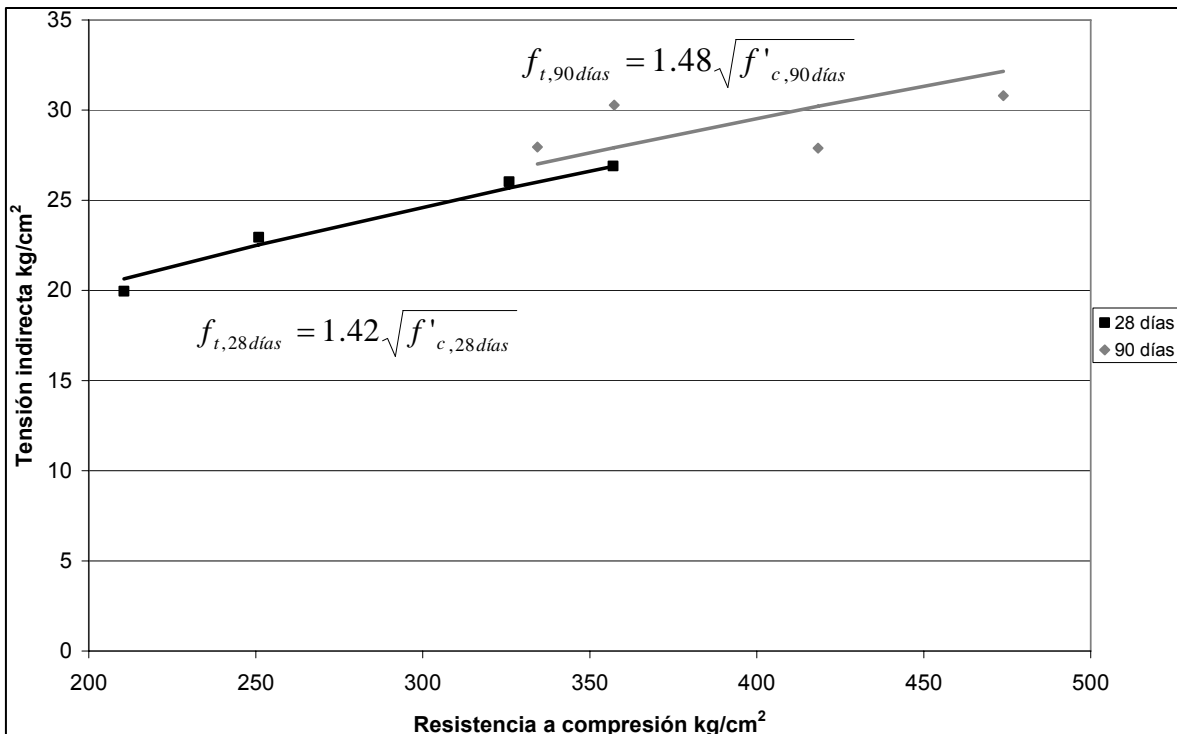


Fig. 5.18 Relación entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'c}$  para las mezclas de ceniza volante con caliza a 28 y 90 días.

En la tabla 5.19 se ve que la relación  $f_t/\sqrt{f'c}$  es mayor para los concretos con agregado grueso calizo, pero esto debido a que estas mezclas tienen mayores resistencias a compresión al tener relaciones  $a/(c+cv)$  menores. Se ve que esta relación aumenta con la edad, en este caso esta relación es mayor a los 90 días que a los 28, y aumentan en mayor grado en las mezclas con agregado andesítico, en donde para las mezcla de control aumenta en promedio 13% y en las mezclas con ceniza volante aumenta 20% a los 90 días en relación con lo que se obtuvo a los 28 días, mientras que en las mezclas con caliza, en las mezclas de control aumenta 6% y en las mezclas con ceniza volante aumenta 4%. Esto también se puede ver en las curvas de las figuras 5.15 a 5.18.

Si comparamos la relación obtenida en las mezclas con ceniza volante contra las de su mezcla de control, vemos que esta relación es mayor para las mezclas de control, en ambos casos, para las mezclas con agregado grueso andesítico y calizo, y para ambas edades, a 28 y 90 días. Y en el caso de las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante alcanzan un mayor porcentaje con respecto a su mezcla de control para ambas edades de 28 y 90 días; a los 28 días las mezclas con ceniza volante de andesita, alcanza el 86% de su mezcla de control y a los 90 días el 92%, mientras que en las mezclas con caliza, la mezcla con ceniza volante tiene 84% de su mezcla de control a los 28 días y el 83% a los 90 días.

### **5.5. Módulo de elasticidad y relación de Poisson.**

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad, y la relación de Poisson, se muestran en las tablas 5.20 a 5.25.

En las tablas 5.20 y 5.23 se ven los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad y la relación de Poisson respectivamente. En las tablas 5.21 y 5.24 se han expresado estos resultados como un porcentaje del resultado obtenido para la mezcla de control a cada edad. Y en las tablas 5.22 y 5.25 los resultados del módulo de elasticidad y la relación de Poisson de cada mezcla se han expresado como un porcentaje del resultado obtenido a los 28 días.

Tabla 5.20 Módulos de elasticidad, en kg/cm<sup>2</sup>.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	148,544	103,899	173,503	134,330	175,618	141,597	269,370	219,772	266,621	228,277	298,464	234,359	315,911	258,066
90	177,695	141,922	202,249	163,550	195,893	170,363	289,931	249,849	292,170	258,716	333,037	288,726	334,942	303,212

Tabla 5.21 Módulos de elasticidad como porcentaje del resultado de la mezcla de control.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	69.9%	100.0%	77.4%	100.0%	80.6%	100.0%	81.6%	100.0%	85.6%	100.0%	78.5%	100.0%	81.7%
90	100.0%	79.9%	100.0%	80.9%	100.0%	87.0%	100.0%	86.2%	100.0%	88.6%	100.0%	86.7%	100.0%	90.5%

Tabla 5.22 Módulos de elasticidad como porcentaje del resultado obtenido a los 28 días.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	119.6%	136.6%	116.6%	121.8%	111.5%	120.3%	107.6%	113.7%	109.6%	113.3%	111.6%	123.2%	106.0%	117.5%

Tabla 5.23 Relación de Poisson.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	0.25	0.16	0.27	0.22	0.29	0.23	0.30	0.26	0.30	0.27	0.33	0.25	0.33	0.31
90	0.28	0.23	0.28	0.28	0.30	0.26	0.31	0.28	0.30	0.28	0.32	0.24	0.33	0.32

Tabla 5.24 Relación de Poisson como porcentaje del resultado de la mezcla de control.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	64.2%	100.0%	81.1%	100.0%	76.8%	100.0%	87.3%	100.0%	89.5%	100.0%	76.8%	100.0%	95.4%
90	100.0%	83.1%	100.0%	97.3%	100.0%	86.9%	100.0%	90.2%	100.0%	91.0%	100.0%	76.4%	100.0%	96.5%

Tabla 5.25 Relación de Poisson como porcentaje del resultado obtenido a los 28 días.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	114.3%	147.8%	105.7%	126.8%	103.2%	116.7%	103.6%	107.1%	100.0%	101.7%	97.6%	97.0%	99.4%	100.4%

En la tabla 5.20 se ve que el módulo de elasticidad aumenta con la edad, esto debido a que está relacionado a la resistencia a compresión la cual aumenta con la edad. El módulo de elasticidad de las mezclas con ceniza volante es menor que los de sus mezclas de control para ambas mezclas, con agregado andesítico y calizo, esto también puede explicarse en la relación del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión. En la tabla 5.21 se ve que el módulo de elasticidad de las mezclas con ceniza volante se va acercando a las de su mezcla de control con el tiempo. En las mezclas con andesita, el módulo de elasticidad de las mezclas con ceniza volante a los 28 días esta entre el 70% y 81% del módulo de su mezcla de control y a los 90 días está entre el 80% y 87%. En las mezclas con caliza, el módulo de elasticidad de las mezclas con ceniza volante a los 28 días esta entre el 79% y 86% del de su mezcla de control y a los 90 días está entre el 86% y 91%. En la tabla 5.22 se ve que la razón de aumento del módulo de elasticidad con el tiempo es mayor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de su control. En las mezclas con andesita, las mezclas de control a los 90 días tienen un modulo de elasticidad que está entre 112% y 120% del módulo de elasticidad obtenido a los 28 días, y las mezclas con ceniza volante tienen un módulo de elasticidad a los 90 días que está entre el 120% y 137% del módulo de elasticidad a los 28 días. En las mezclas con caliza, las mezclas de control tienen un módulo de elasticidad a los 90 días que está entre el 106% y 112% del módulo a los 28 días, y las mezclas con ceniza volante a los 90 días tienen un módulo de elasticidad que está entre el 113% y 123% del módulo obtenido a los 28 días.

En general se puede ver que el comportamiento del módulo de elasticidad esta muy ligado al de la resistencia a compresión, siguiendo las mismas variaciones que ésta.

En la tabla 5.23 se ve que la relación de Poisson aumenta con el tiempo y es menor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de control.

En la tabla 5.24 se ve que la relación de Poisson es menor para las mezclas con ceniza volante, pero que estas se van acercando a las de su mezcla de control con la edad. En las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante tienen una relación de Poisson a los 28 días que está entre el 64% y 81% de la que tiene su mezcla de control y a los 90 días está entre el 83% y 97% de la de su mezcla de control. En las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante tienen a los 28 días una relación de Poisson que esta entre el 77% y 95% de la obtenida en su mezcla de control, y a los 90 días está entre el 76% y 96%.

En la tabla 5.25 se ve que el aumento de la relación de Poisson con el tiempo es mayor en las mezclas con ceniza volante. En las mezclas con andesita, las mezclas de control tienen una relación de Poisson a los 90 días que está entre el 103% y 114% de la obtenida a los 28 días, y en las mezclas con ceniza volante está entre el 117% y 148%. En las mezclas con caliza, las mezclas de control tienen una relación de Poisson a los 90 días que está entre el 98% y 104% de la de 28 días, y las mezclas con ceniza volante tienen una relación de Poisson a los 90 días que está entre el 98% y 107% de la obtenida a los 28 días.

En las tablas 5.26 a 5.29 se muestran las relaciones para el módulo de elasticidad,  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas según el tipo de agregado y cementante utilizado.

Tabla 5.26 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas de control con andesita.

Mezcla	$f_c$		$E_c$		$E_c / \sqrt{f_c}$	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
M1 C200 GA	276	301	148,544	177,695	8,941	10,234
M2 C250 GA	421	474	173,503	202,249	8,454	9,287
M3 C300 GA	400	461	175,618	195,893	8,785	9,128
promedio					8,727	9,550

Tabla 5.27 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas con ceniza volante y andesita.

Mezcla	$f_c$		$E_c$		$E_c / \sqrt{f_c}$	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
M1 HVFA200 GA	89	158	103,899	141,922	10,987	11,295
M2 HVFA250 GA	174	269	134,330	163,550	10,189	9,973
M3 HVFA300 GA	196	322	141,597	170,363	10,113	9,488
promedio					10,430	10,252

Tabla 5.28 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas de control con caliza.

Mezcla	$f_c$		$E_c$		$E_c / \sqrt{f_c}$	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
M4 C300 GC	370	425	269,370	289,931	13,995	14,056
M5 C350 GC	438	462	266,621	292,170	12,742	13,588
M6 C400 GC	532	576	298,464	333,037	12,937	13,880
M7 C450 GC	563	653	315,911	334,942	13,316	13,103
promedio					13,247	13,657

Tabla 5.29 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas con ceniza volante y caliza.

Mezcla	$f_c$		$E_c$		$E_c / \sqrt{f_c}$	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
M4 HVFA300 GC	211	334	219,772	249,849	15,146	13,664
M5 HVFA350 GC	251	357	228,277	258,716	14,413	13,687
M6 HVFA400 GC	326	418	234,359	288,726	12,982	14,116
M7 HVFA450 GC	357	474	258,066	303,212	13,658	13,929
			promedio		14,050	13,849

En la tabla 5.30 se presenta un resumen de las relaciones obtenidas entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$  para las mezclas según el tipo de agregado grueso y cementante usado.

Con las tablas 5.26 a 5.30 se han hecho las curvas que muestran esta relación para los 28 y 90 días.

Tabla 5.30 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f_c}$ .

Mezcla		$E_c / \sqrt{f_c}$		Porcentaje con respecto a la mezcla de control		Porcentaje con respecto a 28 días	
		28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
Andesita	Cemento	8,727	9,550	100.0%	100.0%	100.0%	109.4%
Andesita	Cemento - Ceniza	10,430	10,252	119.5%	107.4%	100.0%	98.3%
Caliza	Cemento	13,247	13,657	100.0%	100.0%	100.0%	103.1%
Caliza	Cemento - Ceniza	14,050	13,849	106.1%	101.4%	100.0%	98.6%

En la tabla 5.30 se ve que la relación  $E_c / \sqrt{f_c}$  es mayor para las mezclas con agregado calizo que para las de agregado andesítico y es mayor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de control. En las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante a los 28 días tienen una relación  $E_c / \sqrt{f_c}$  que es el 120% de la de su mezcla de control, a los 90 días esta relación es el 107% de la de su mezcla de control. En las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante a los 28 días tienen una relación  $E_c / \sqrt{f_c}$  que es el 106% de la de su mezcla de control, y a los 90 días esta relación es el 101% de la de su mezcla de control. Al parecer esta relación  $E_c / \sqrt{f_c}$  tiende a igualarse entre las mezclas de control con las mezclas con ceniza volante en el tiempo, pero es difícil predecir una tendencia sólo con dos puntos.



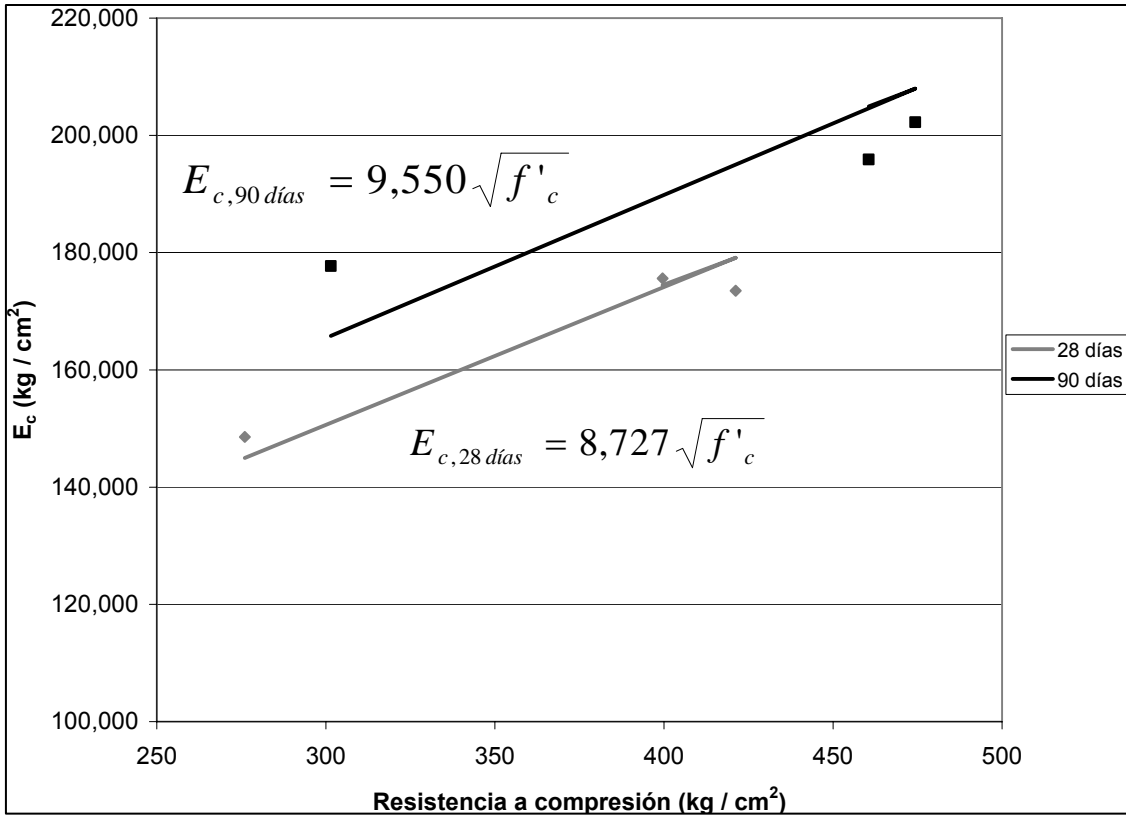


Fig. 5.19 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con andesita a los 28 y 90 días.

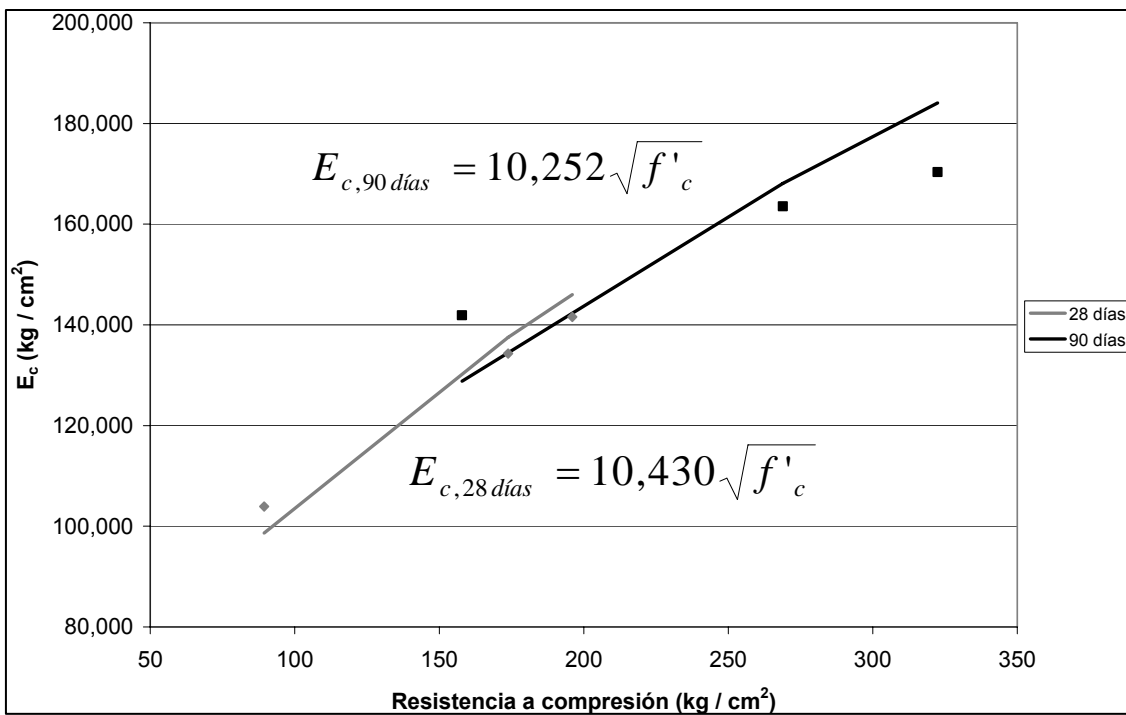


Fig. 5.20 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza con andesita a los 28 y 90 días.

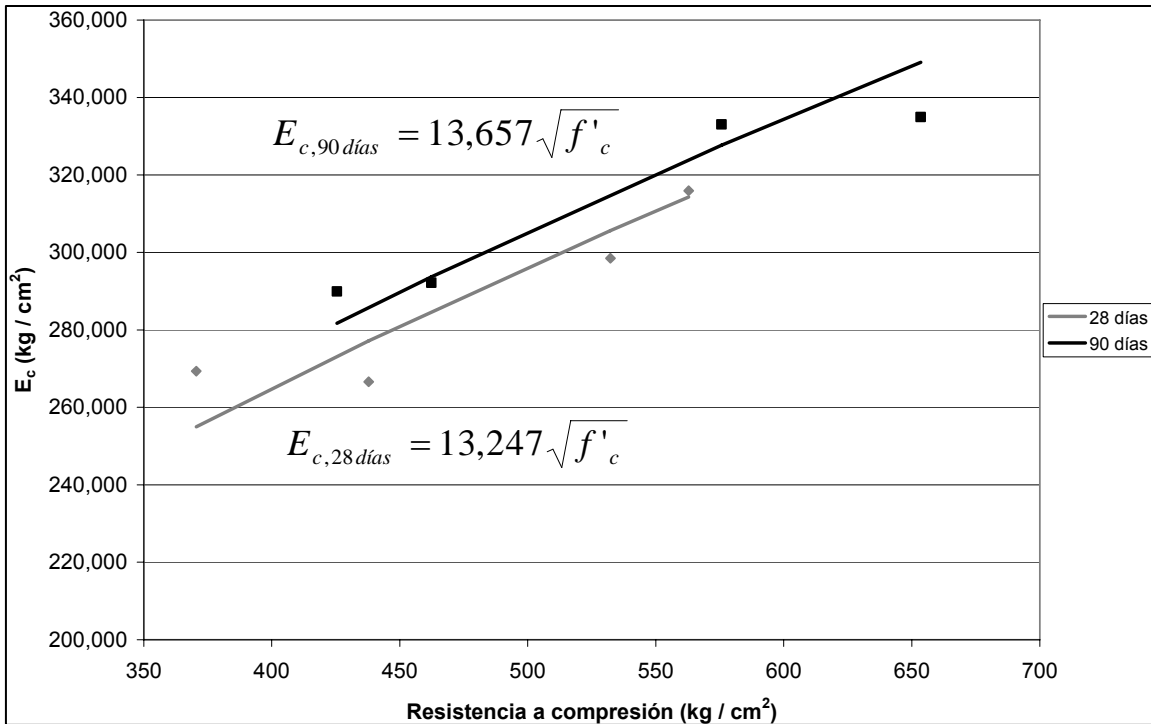


Fig. 5.21 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con caliza a los 28 y 90 días.

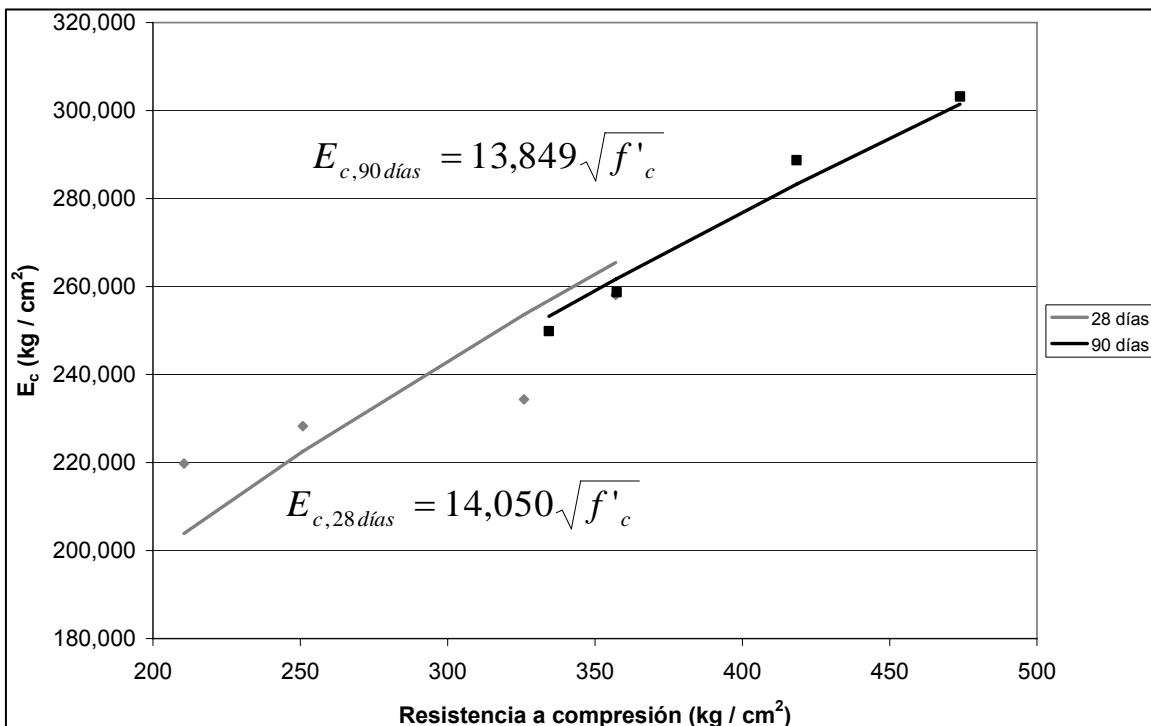


Fig. 5.22 Relación entre  $E_c$ , y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza con caliza a los 28 y 90 días.

En la tabla 5.30 y en las figuras 5.19 a 5.22 se ve que para las mezclas de control, la relación  $E_c/\sqrt{f_c}$  es mayor a los 90 días que a los 28, esto para ambos casos, en las mezclas con andesita es mayor en 9% y en las de caliza en 3%. Para las mezclas con ceniza volante esta relación es menor a los 90 días en comparación a los 28 días, en las mezclas con andesita a los 90 días esta relación es el 98% de la que se obtiene a los 28 días, y en las mezclas con caliza, esta relación a los 90 días es el 99% de la de 28 días.

Estas diferencias en la relación  $E_c/\sqrt{f_c}$  no son muy grandes, esto también se ve en las curvas de las figuras 5.19 a 5.22, y salvo en las mezclas de control de andesita en donde la diferencia es de 9% en el resto esta diferencia no pasa del 3%, por lo que se podría tener una misma relación  $E_c/\sqrt{f_c}$  para ambas edades.

En las figuras 5.20 y 5.22 se ve más claramente que la diferencia en el módulo de elasticidad a distintas edades no se debe a una variación de la relación  $E_c/\sqrt{f_c}$ , si no más bien al aumento de la resistencia a compresión con la edad.

En las tablas 5.31 a 5.34 y en las figuras 5.23 a 5.26 se presenta la variación de la relación de Poisson con la resistencia a compresión.

Tabla 5.31 Relación entre  $\mu$  y  $f_c$  para las mezclas de control con andesita.

Mezcla			f'c		$\mu$	
			28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	276	301	0.25	0.28
		M2 C250 GA	421	474	0.27	0.28
		M3 C300 GA	400	461	0.29	0.30

Tabla 5.32 Relación entre  $\mu$  y  $f_c$  para las mezclas de ceniza volante con andesita.

Mezcla			f'c		$\mu$	
			28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	89	158	0.16	0.23
		M2 HVFA250 GA	174	269	0.22	0.28
		M3 HVFA300 GA	196	322	0.23	0.26

Tabla 5.33 Relación entre  $\mu$  y  $f'_c$  para las mezclas de control con caliza.

Mezcla			$f'_c$		$\mu$	
			28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	370	425	0.30	0.31
		M5 C350 GC	438	462	0.30	0.30
		M6 C400 GC	532	576	0.33	0.32
		M7 C450 GC	563	653	0.33	0.33

Tabla 5.34 Relación entre  $\mu$  y  $f'_c$  para las mezclas de ceniza volante con caliza.

Mezcla			$f'_c$		$\mu$	
			28 días	90 días	28 días	90 días
			kg /cm <sup>2</sup>	kg /cm <sup>2</sup>		
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	211	334	0.26	0.28
		M5 HVFA350 GC	251	357	0.27	0.28
		M6 HVFA400 GC	326	418	0.25	0.24
		M7 HVFA450 GC	357	474	0.31	0.32

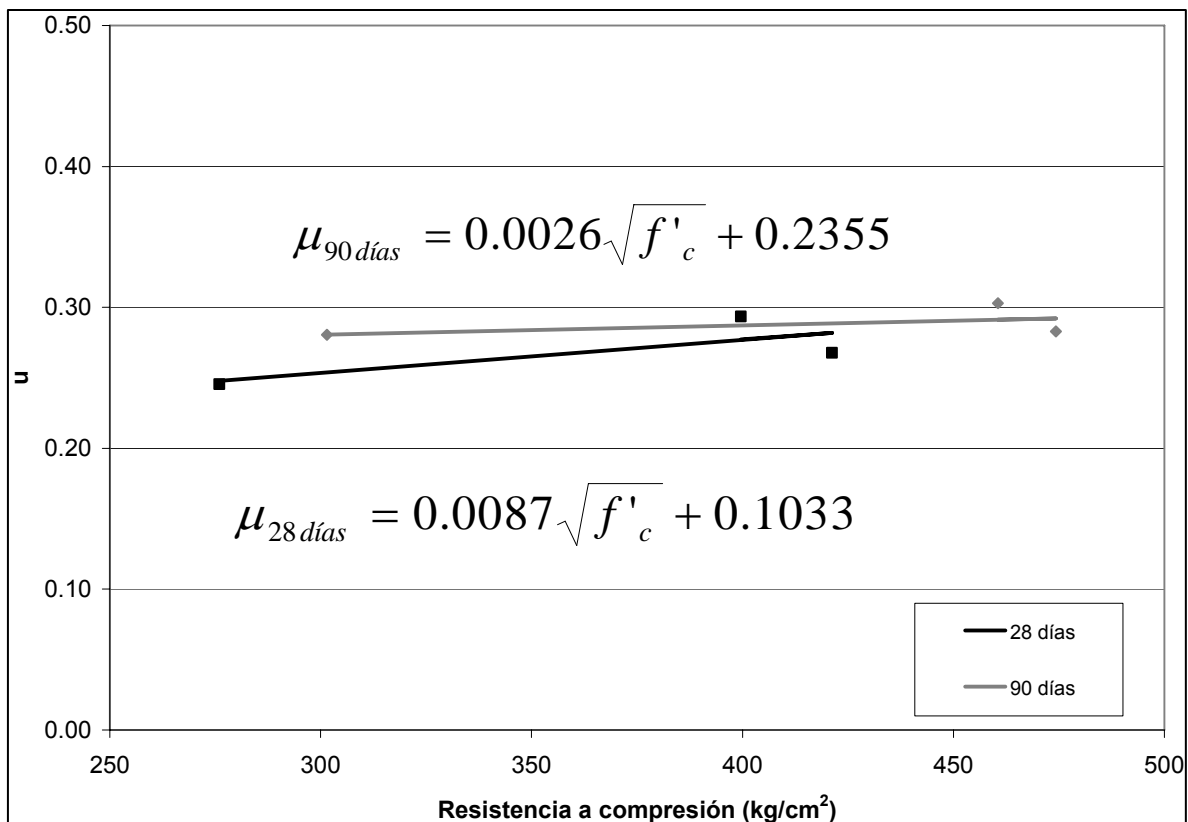


Fig. 5.23 Relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con andesita.

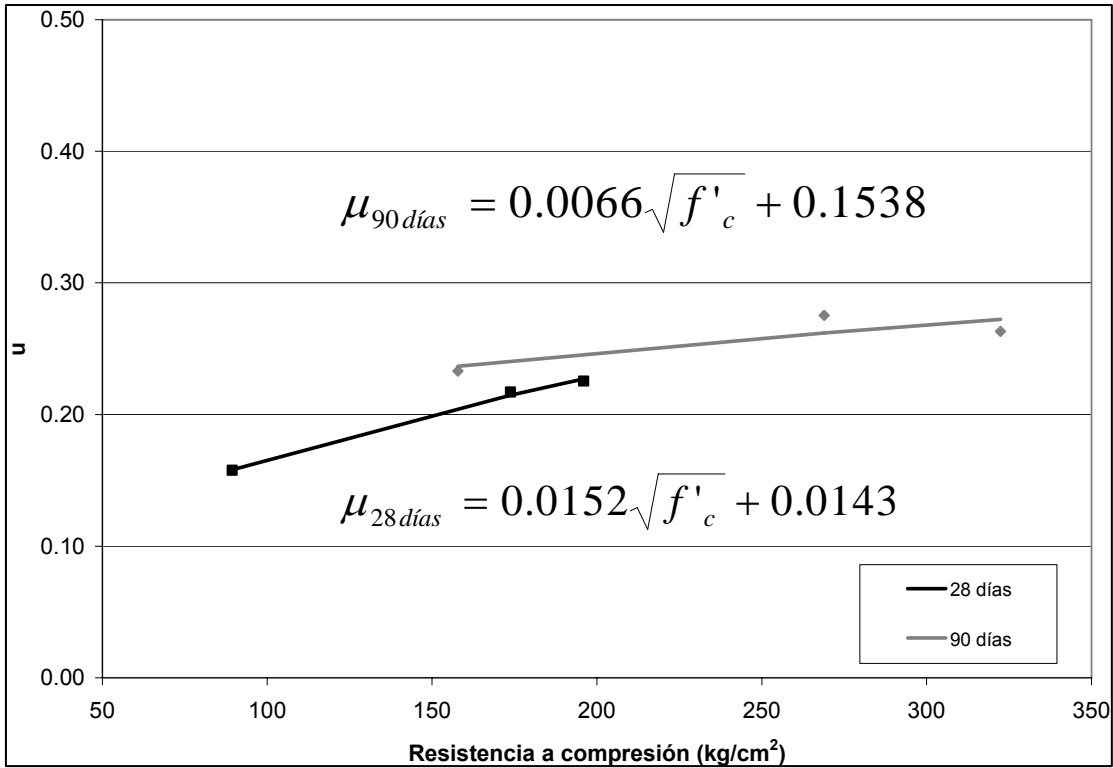


Fig. 5.24 Relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de ceniza volante con andesita.

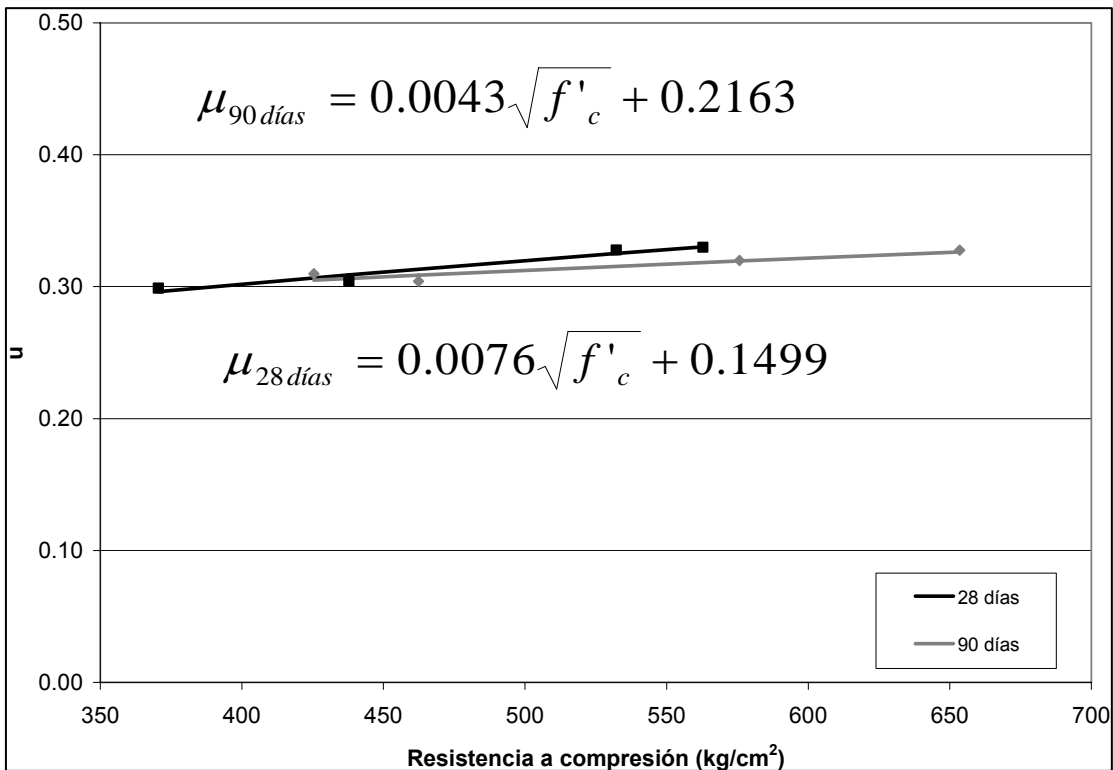


Fig. 5.25 Relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'_c}$  para las mezclas de control con caliza.

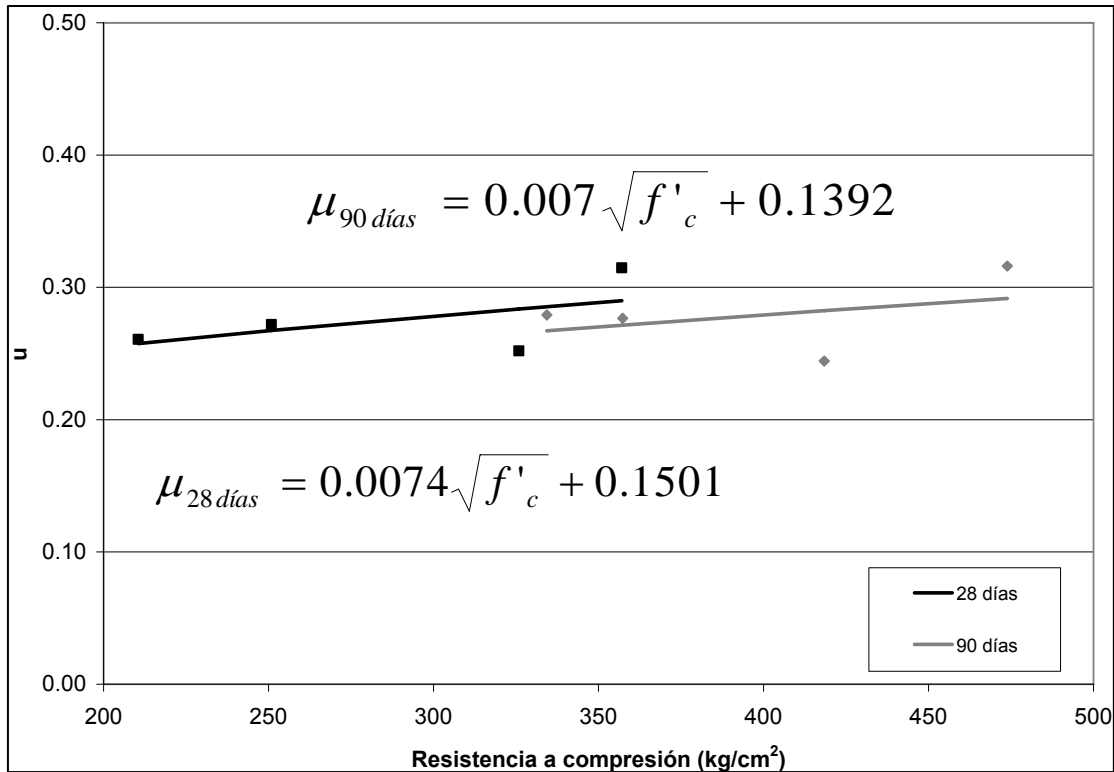


Fig. 5.26 Relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'c}$  para las mezclas de ceniza volante con caliza.

En las curvas de ajuste de las figuras 5.23 a 5.26 se ve que estas no varían mucho con la edad, la relación de Poisson ( $\mu$ ) aumenta con la edad pero debido al incremento de la resistencia a compresión y no a un cambio sustancial en esta relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'c}$ .

En los resultados obtenidos se ve que para las mezclas con andesita esta relación aumenta de 28 a 90 días; para ambos casos, las mezclas de control y las mezclas con ceniza volante, la curva de ajuste a los 90 días está sobre la de los 28 días. En las mezclas con caliza se ve que la relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'c}$  disminuye.

En el caso de las mezclas con ceniza volante se ve que hay una mayor diferencia entre la relación de Poisson a los 28 y 90 días pero se debe a una mayor amplitud en las diferencias de la resistencia a compresión.

En todos los casos se ve que el ajuste de la relación entre  $\mu$  y  $\sqrt{f'c}$  se podría haber hecho sin considerar la edad de los ensayos, es decir tener una sola relación para ambas edades.

## 5.6. Contracción por secado.

En la tabla 5.35 se muestran los resultados de los ajustes de las lecturas de la contracción por secado. Las gráficas donde se ven las lecturas en el tiempo y las curvas de ajuste se presentan en el anexo.

En las tablas 5.36 se presentan estos resultados ajustados como un porcentaje de la mezcla de control y en la tabla 5.37 se presentan como porcentaje de la contracción última.

En la figura 5.27 se han graficado las contracciones últimas con los valores de la tabla 5.35.

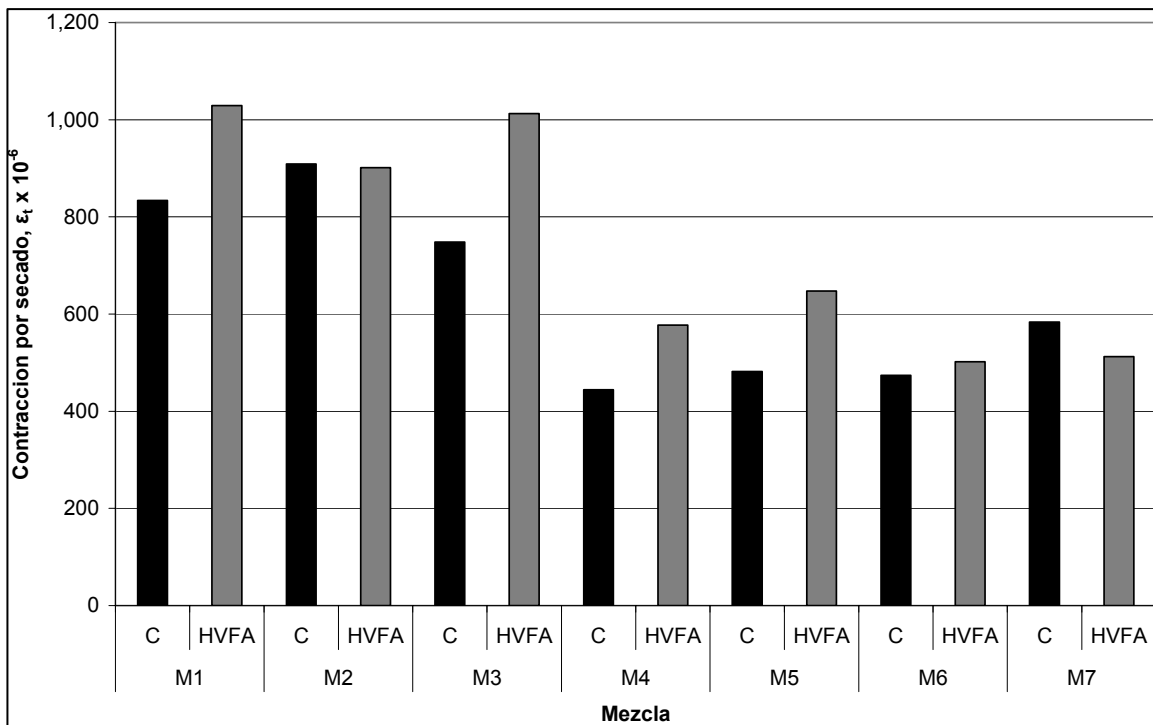


Fig. 5.27 Contracción por secado última.

En la tabla 5.35 y figura 5.27 se ve que la contracción por secado es menor para las mezclas con agregado calizo en comparación con las de agregado andesítico.

En general se ve que la contracción por secado en las mezclas con ceniza volante es mayor en comparación con las de su mezcla de control, esto para las mezclas con agregado andesítico y calizo. Sólo en el caso de las mezclas M2 y M7 se obtienen mayores contracciones para las mezclas de control, y en la caso de la mezcla M2 la diferencia en la contracción ultima es de sólo 1%.

Tabla 5.35 Valores ajustados de contracción por secado.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	326	370	367	336	243	345	176	181	171	291	163	188	197	110
28	600	712	664	634	492	682	322	373	331	495	321	354	391	268
90	744	904	815	797	644	880	397	493	422	591	413	444	506	399
180	786	962	859	846	692	942	419	532	450	618	441	471	542	449
365	810	995	884	873	719	976	431	554	465	632	457	486	562	479
$\epsilon_u$	834	1,029	909	901	748	1,013	444	577	482	647	474	502	583	512

Tabla 5.36 Porcentaje de la contracción por secado con respecto a la mezcla de control.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	100.0%	113.4%	100.0%	91.5%	100.0%	142.0%	100.0%	102.4%	100.0%	170.2%	100.0%	115.6%	100.0%	56.0%
28	100.0%	118.5%	100.0%	95.6%	100.0%	138.7%	100.0%	115.8%	100.0%	149.6%	100.0%	110.5%	100.0%	68.4%
90	100.0%	121.5%	100.0%	97.8%	100.0%	136.7%	100.0%	124.2%	100.0%	140.0%	100.0%	107.7%	100.0%	78.8%
180	100.0%	122.4%	100.0%	98.4%	100.0%	136.1%	100.0%	126.9%	100.0%	137.3%	100.0%	106.9%	100.0%	82.8%
365	100.0%	122.9%	100.0%	98.8%	100.0%	135.7%	100.0%	128.4%	100.0%	135.9%	100.0%	106.4%	100.0%	85.2%
$\epsilon_u$	100.0%	123.4%	100.0%	99.2%	100.0%	135.4%	100.0%	130.0%	100.0%	134.4%	100.0%	105.9%	100.0%	87.8%

Tabla 5.37 Porcentaje de la contracción por secado con respecto a la contracción última.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	39.1%	35.9%	40.3%	37.2%	32.4%	34.0%	39.7%	31.3%	35.5%	45.0%	34.4%	37.5%	33.7%	21.5%
28	72.0%	69.2%	73.0%	70.4%	65.8%	67.4%	72.5%	64.6%	68.8%	76.6%	67.7%	70.6%	67.1%	52.3%
90	89.2%	87.8%	89.7%	88.4%	86.1%	86.9%	89.5%	85.4%	87.6%	91.3%	87.1%	88.5%	86.7%	77.9%
180	94.3%	93.5%	94.6%	93.8%	92.5%	93.0%	94.4%	92.1%	93.4%	95.5%	93.1%	93.9%	92.9%	87.6%
365	97.1%	96.7%	97.2%	96.9%	96.2%	96.4%	97.2%	96.0%	96.6%	97.7%	96.5%	96.9%	96.4%	93.5%
$\epsilon_u$	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%



Para las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante alcanzan una contracción por secado última entre 99% y 135% de la obtenida en la mezcla de control. Para las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante alcanzan contracciones por secado últimas entre el 88% y 134% de la obtenida en la mezcla de control.

En las tablas 5.38 a 5.41 se presentan las ecuaciones de ajuste para las diferentes mezclas.

Tabla 5.38 Expresiones para la predicción de la contracción por secado para las mezclas de control con andesita.

Agregado	Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Relación para predecir la contracción por secado
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{10.91 + t} \right) 834 \times 10^{-6}$
		M2 C250 GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{10.35 + t} \right) 909 \times 10^{-6}$
		M3 C300 GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{14.57 + t} \right) 748 \times 10^{-6}$

Tabla 5.39 Expresiones para la predicción de la contracción por secado para las mezclas con ceniza volante y andesita.

Agregado	Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Relación para predecir la contracción por secado
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{12.49 + t} \right) 1029 \times 10^{-6}$
		M2 HVFA250 GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{11.80 + t} \right) 901 \times 10^{-6}$
		M3 HVFA300 GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{13.56 + t} \right) 1013 \times 10^{-6}$

Tabla 5.40 Expresiones para la predicción de la contracción por secado para las mezclas de control con caliza.

Agregado	Mezcla		Relación a/(c+cv)	Relación para predecir la contracción por secado
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	0.57	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{10.61 + t} \right) 444 \times 10^{-6}$
		M5 C350 GC	0.51	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{12.72 + t} \right) 482 \times 10^{-6}$
		M6 C400 GC	0.46	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{13.37 + t} \right) 474 \times 10^{-6}$
		M7 C450 GC	0.41	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{13.75 + t} \right) 583 \times 10^{-6}$

Tabla 5.41 Expresiones para la predicción de la contracción por secado para las mezclas con ceniza volante y caliza.

Agregado	Mezcla		Relación a/(c+cv)	Relación para predecir la contracción por secado
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	0.57	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{15.37 + t} \right) 577 \times 10^{-6}$
		M5 HVFA350 GC	0.51	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{8.57 + t} \right) 647 \times 10^{-6}$
		M6 HVFA400 GC	0.46	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{11.66 + t} \right) 502 \times 10^{-6}$
		M7 HVFA450 GC	0.41	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{25.57 + t} \right) 512 \times 10^{-6}$

Con los valores de la contracción última y la relación a/(c+cv) se han graficado las curvas de las figuras 5.28 y 5.29, en ellas se ve la variación de la contracción por secado última con la relación a/(c+cv).

En las mezclas con andesita (fig. 5.28) se ve que la tendencia es que las mezclas con ceniza volante tengan mayores contracciones por secado que las de su mezcla de control, aproximadamente en 18% si se considera la curva de ajuste. La contracción por secado última también aumentan con la relación a/(c+cv).

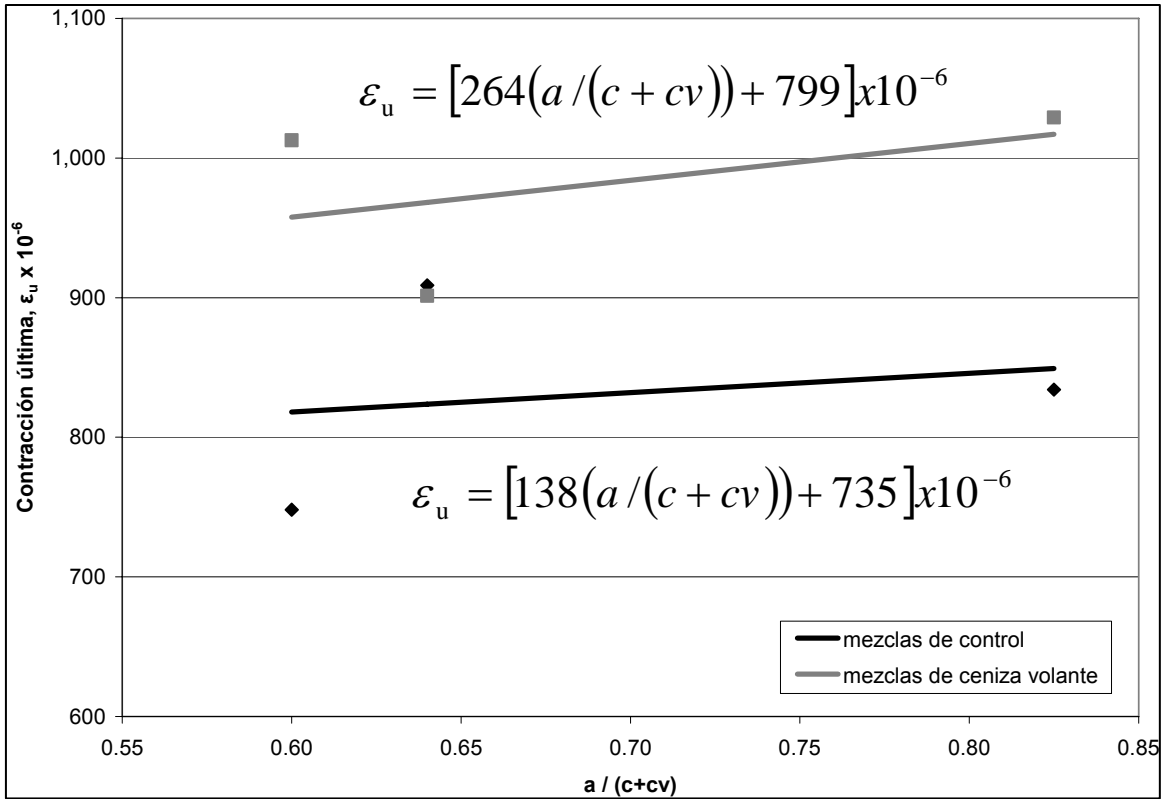


Fig. 5.28 Variación de la contracción última con la relación  $a/(c+cv)$  para las mezclas con andesita.

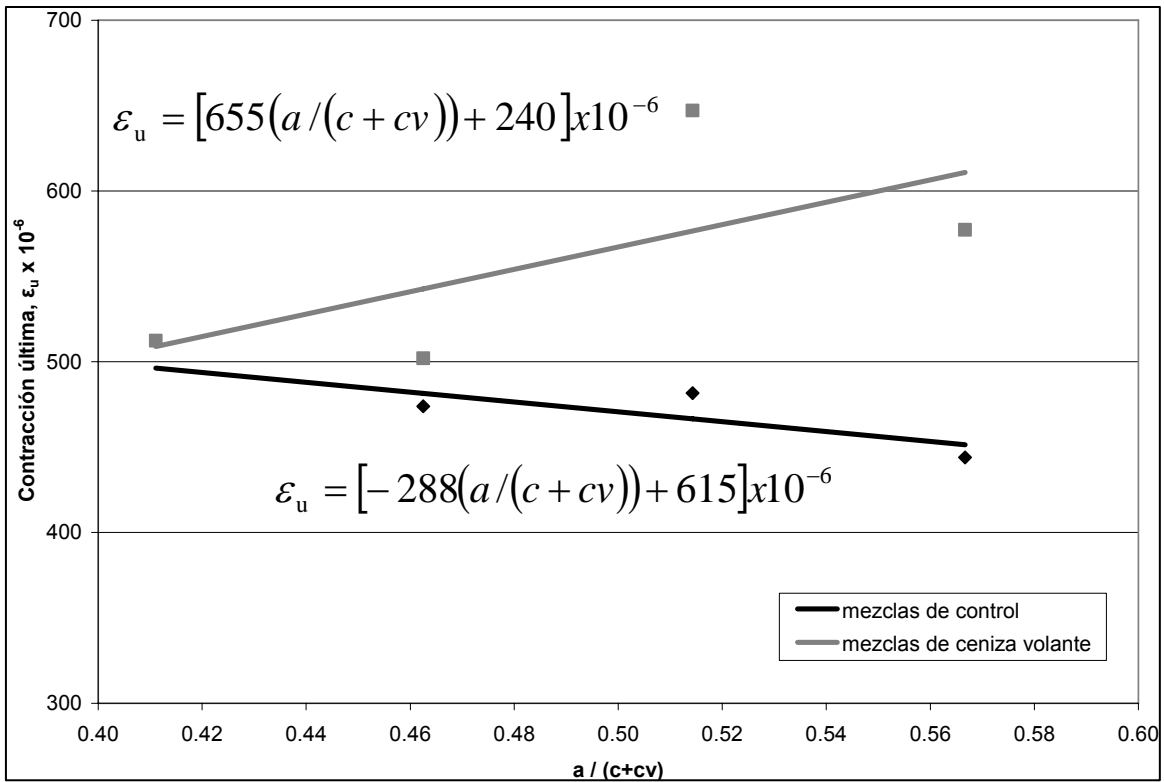


Fig. 5.29 Variación de la contracción última con la relación  $a/(c+cv)$  para las mezclas con caliza.

En las mezclas con caliza (fig. 5.29) lo más notorio es la tendencia de las mezclas de control a disminuir la contracción por secado última con el aumento de la relación  $a/(c+cv)$ . Esta tendencia anómala se debe a un valor alto de la contracción por secado última en la mezcla M7; esta mezcla también fue la única en la que la contracción por secado de la mezcla de control resulto mayor que la de la mezcla con ceniza volante. Al presentar esta mezcla un resultado contrario a lo esperado se decidió no considerar estos valores para el análisis de los resultados.

En las mezclas con ceniza volante de las mezclas con agregado calizo también se ve la tendencia de un aumento de la contracción por secado última con el aumento de la relación  $a/(c+cv)$ . Si no se considera los resultados de las mezclas M7, las mezclas con ceniza volante presentan una mayor contracción por secado última en comparación con las obtenidas para sus mezclas de control.

### 5.7. Deformación diferida.

Se hicieron lecturas hasta los 280 días para determinar el flujo plástico, estas lecturas se ajustaron a unas curvas y se calcularon los coeficientes de deformación diferida última. Los puntos obtenidos de las lecturas y las curvas de ajuste se ven en la figura 5.30.

Tabla 5.42 Expresiones para la predicción de la deformación diferida.

Agregado	Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Relación para predecir la contracción por secado
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	0.57	$c_t = \left( \frac{t^{0.6}}{23.51 + t^{0.6}} \right) 4.37$
	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	0.57	$c_t = \left( \frac{t^{0.6}}{6.40 + t^{0.6}} \right) 2.96$

En la tabla 5.43 se muestran las deformaciones diferidas calculadas con las expresiones encontradas. Se usaron estos valores para los análisis y no los puntos obtenidos de las lecturas ya que reflejan la tendencia y no un valor puntual. En la misma tabla se expresan estos valores como un porcentaje de los valores calculados para la mezcla de control y en la siguiente tabla como un porcentaje del coeficiente de deformación diferida última.

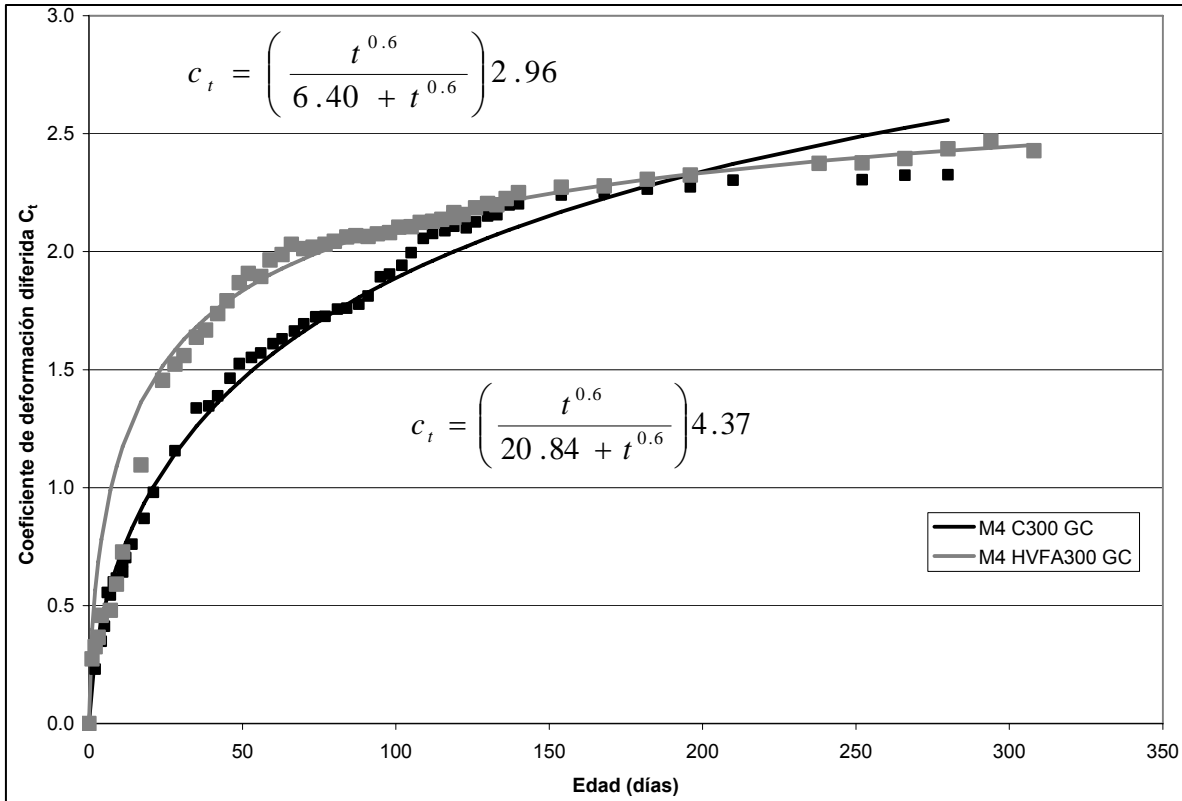


Fig. 5.30 Variación del coeficiente de deformación diferida con el tiempo.

Tabla 5.43 Coeficientes de deformación diferida calculadas.

Edad (días)	M4		M4		M4	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	0.58	0.99	100.0%	169.3%	13.4%	33.4%
14	0.83	1.28	100.0%	154.3%	18.9%	43.2%
28	1.14	1.58	100.0%	138.5%	26.2%	53.6%
90	1.82	2.07	100.0%	113.5%	41.6%	69.9%
180	2.27	2.30	100.0%	101.4%	52.0%	77.9%
365	2.72	2.49	100.0%	91.5%	62.3%	84.3%
C <sub>u</sub>	4.37	2.96	100.0%	67.6%	100.0%	100.0%

En este ensayo se compararon dos mezclas con la misma relación  $a/(c+cv)$ , aunque con diferentes resistencias a compresión por las características de cada uno, las cargas a las que estuvieron sometidas fueron distintas aunque en ambos casos se cargó al 40% de su resistencia a compresión a 28 días.

Como se ve en la figura 5.30 y en la tabla 5.43 el coeficiente de deformación diferida última es menor para la mezcla con ceniza volante ( $C_u = 2.96$ ), el valor calculado es el 68% del calculado para la mezcla de control ( $C_u = 4.37$ ).

Hasta la fecha de toma de lecturas, la deformación diferida es mayor para la mezcla de ceniza volante, sobre todo al inicio, pero se ve que la tendencia es que ésta aumente en menor proporción que la de la mezcla de control, llegando en el tiempo a tener una menor deformación diferida.

### **5.8. Resistencia del concreto a la permeabilidad de los cloruros.**

Los resultados obtenidos para este ensayo se muestran en la tabla 5.44, en la tabla 5.45 estos resultados se han expresado como un porcentaje de los resultados obtenidos en su mezcla de control y en la tabla 5.46 los resultados se expresan como un porcentaje del valor obtenido a los 28 días. En la figura 5.31 se ha hecho un gráfico de barras con los resultados de la tabla 5.44.

En las tablas y en el gráfico se ve que a los 28 días la permeabilidad es mayor en las mezclas con ceniza volante. En las mezclas con andesita, la permeabilidad obtenida en las mezclas con ceniza volante a los 28 días está entre el 126% y 148% de la alcanzada para su mezcla de control. En las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante tuvieron permeabilidades a los 28 días de entre el 75% y el 116% de la obtenida para su mezcla de control, la mezcla M7 fue la única en donde a los 28 días la mezcla de ceniza volante tuvo una permeabilidad menor a la de su mezcla de control.

A los 90 días esta tendencia cambió debido a la reacción de la ceniza volante de las mezclas. Se obtuvieron permeabilidades menores para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de control. En las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante tuvieron permeabilidades de entre el 26% y 36% de la obtenida en su mezcla de control. En las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante tuvieron permeabilidades de entre el 24% y el 42% de la obtenida en su mezcla de control. Esto incluso cuando a esta edad la resistencia a compresión de las mezclas con ceniza volante sigue siendo menor que las de su mezcla de control.

Tabla 5.44 Resultados de ensayos de permeabilidad a los cloruros, en coulombs.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	5,501	6,955	4,266	6,327	4,777	6,681	2,887	2,905	3,077	3,260	2,512	2,920	2,873	2,164
90	2,959	1,063	2,480	633	3,090	801	1,887	461	1,832	582	1,253	531	1,445	549

Tabla 5.45 Resultados expresados como un porcentaje del resultado obtenido en la mezcla de control.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	126.4%	100.0%	148.3%	100.0%	139.9%	100.0%	100.6%	100.0%	105.9%	100.0%	116.2%	100.0%	75.3%
90	100.0%	35.9%	100.0%	25.5%	100.0%	25.9%	100.0%	24.4%	100.0%	31.8%	100.0%	42.4%	100.0%	38.0%

Tabla 5.46 Resultados expresados como un porcentaje del resultado obtenido a los 28 días.

Edad (días)	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
28	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90	53.8%	15.3%	58.1%	10.0%	64.7%	12.0%	65.3%	15.9%	59.5%	17.9%	49.9%	18.2%	50.3%	25.4%

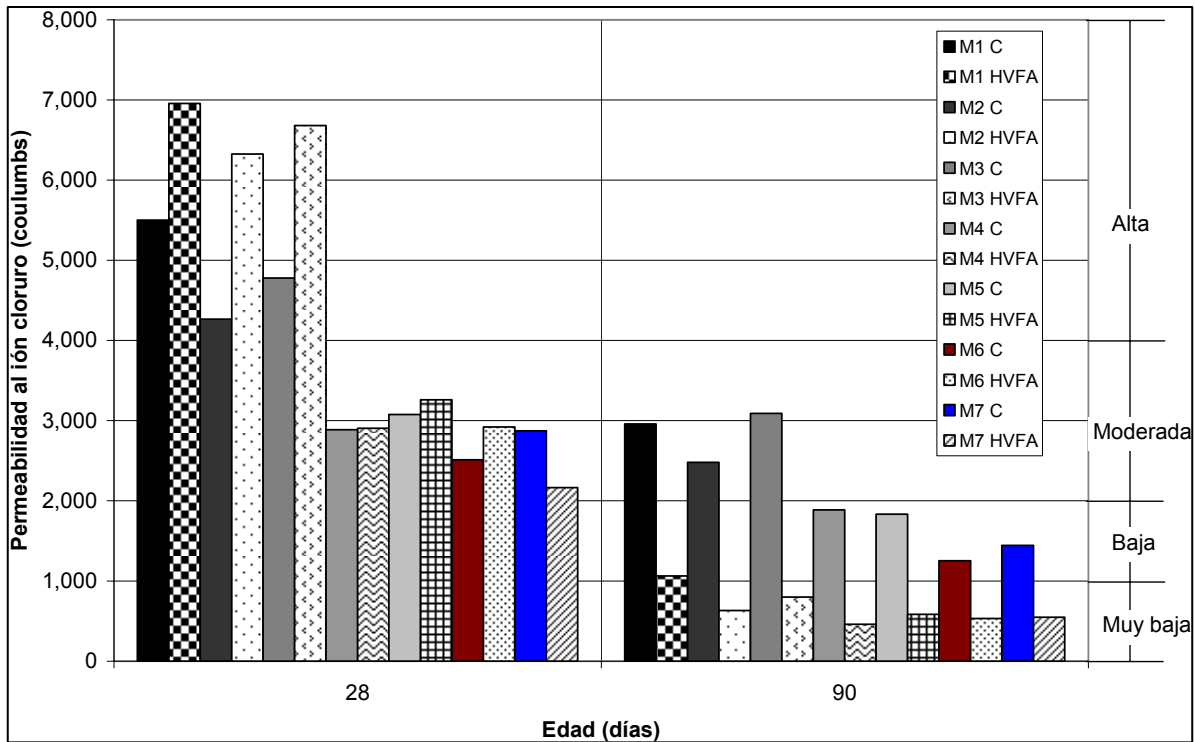


Fig. 5.31 Resultados de ensayos de permeabilidad a los cloruros.

En general se ve que la permeabilidad disminuye con el tiempo, como era de esperarse, debido a que continúa la reacción de los cementantes, cemento pórtland y ceniza volante. Esta reducción de la permeabilidad es mayor en las mezclas con ceniza volante debido al mayor grado de reacción en el tiempo en comparación con el que se tiene a los 28 días. En las mezclas con andesita, las mezclas de control a los 90 días tuvieron permeabilidades de entre el 54% y 65% de la obtenida a los 28 días, en las mezclas con ceniza volante la permeabilidad a los 90 días fue entre el 10% y 15% de la obtenida a los 28 días. En las mezclas con caliza, las mezclas de control tuvieron permeabilidades a los 90 días de entre el 50% y 65% de la que se obtuvo a los 28 días, mientras que en las mezclas con ceniza volante, las permeabilidades a los 90 días fueron de entre el 16% y 25% de la que se tuvo a los 28 días.

Se ve que hay una diferencia marcada entre las permeabilidades obtenidas para las mezclas con andesita y las de caliza. A los 28 días hay una diferencia de aproximadamente 40% para las mezclas de control, y 60% para las mezclas con ceniza volante. A los 90 días las diferencias son aproximadamente de 40% para las mezclas de control y las de ceniza volante. Esta diferencia no es sólo debido al tipo de



agregado utilizado, influye también la diferencia que existe en la relación  $a/(c+cv)$  de las mezclas.

En la tabla 5.47 se encuentran los parámetros para medir la permeabilidad al ion cloruro de la norma ASTM C 1202.

Tabla 5.47 Parámetros para medir la permeabilidad al ion cloruro (ASTM C 1202).

Coulombs	Permeabilidad al ion cloruro	Típico de:
> 4,000	Alta	Alta relación A/C
4,000 - 2,000	Moderada	Relación A/C 0.4 - 0.5
2,000 - 1,000	Baja	Relación A/C < 0.4
1,000 - 100	Muy baja	Concreto modificado con látex
< 100	Insignificante	Concreto modificado con polímeros

Según estos parámetros, las mezclas con ceniza volante y andesita a los 28 días obtuvieron permeabilidades altas, típicas de mezclas con relación  $a/c > 0.5$ , mientras que las mezclas de caliza tuvieron permeabilidades moderadas, típicas de mezclas con relación  $a/c$  entre 0.4 y 0.5. A los 90 días ambos grupos de mezclas con ceniza volante, con andesita y caliza, tuvieron permeabilidades muy bajas.

En las tablas 5.48 a 5.51 se relaciona la permeabilidad en coulombs obtenida con la relación  $a/(c+cv)$  para cada grupo de mezclas.

Tabla 5.48 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$  para las mezclas de control con andesita.

Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Coulombs 28 días	Coulombs 90 días	
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	0.83	5,501	2,959
		M2 C250 GA	0.64	4,266	2,480
		M3 C300 GA	0.60	4,777	3,090

Tabla 5.49 Relación entre la permeabilidad y la relación  $a/(c+cv)$  para las mezclas con ceniza volante y andesita.

Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Coulombs 28 días	Coulombs 90 días	
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	0.83	6,955	1,063
		M2 HVFA250 GA	0.64	6,327	633
		M3 HVFA300 GA	0.60	6,681	801

Tabla 5.50 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$  para las mezclas de control con caliza.

Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Coulombs 28 días	Coulombs 90 días	
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	0.57	2,887	1,887
		M5 C350 GC	0.51	3,077	1,832
		M6 C400 GC	0.46	2,512	1,253
		M7 C450 GC	0.41	2,873	1,445

Tabla 5.51 Relación entre la permeabilidad y la relación  $a/(c+cv)$  para las mezclas con ceniza volante y caliza.

Mezcla		Relación $a/(c+cv)$	Coulombs 28 días	Coulombs 90 días	
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	0.57	2905.00	460.75
		M5 HVFA350 GC	0.51	3259.67	582.20
		M6 HVFA400 GC	0.46	2920.00	531.00
		M7 HVFA450 GC	0.41	2164.20	549.25

Con estas tablas se hicieron las gráficas de las figuras 5.32 a 5.35 y se hallaron las expresiones que relacionan la permeabilidad y la relación  $a/(c+cv)$  para los diferentes grupos de mezclas.

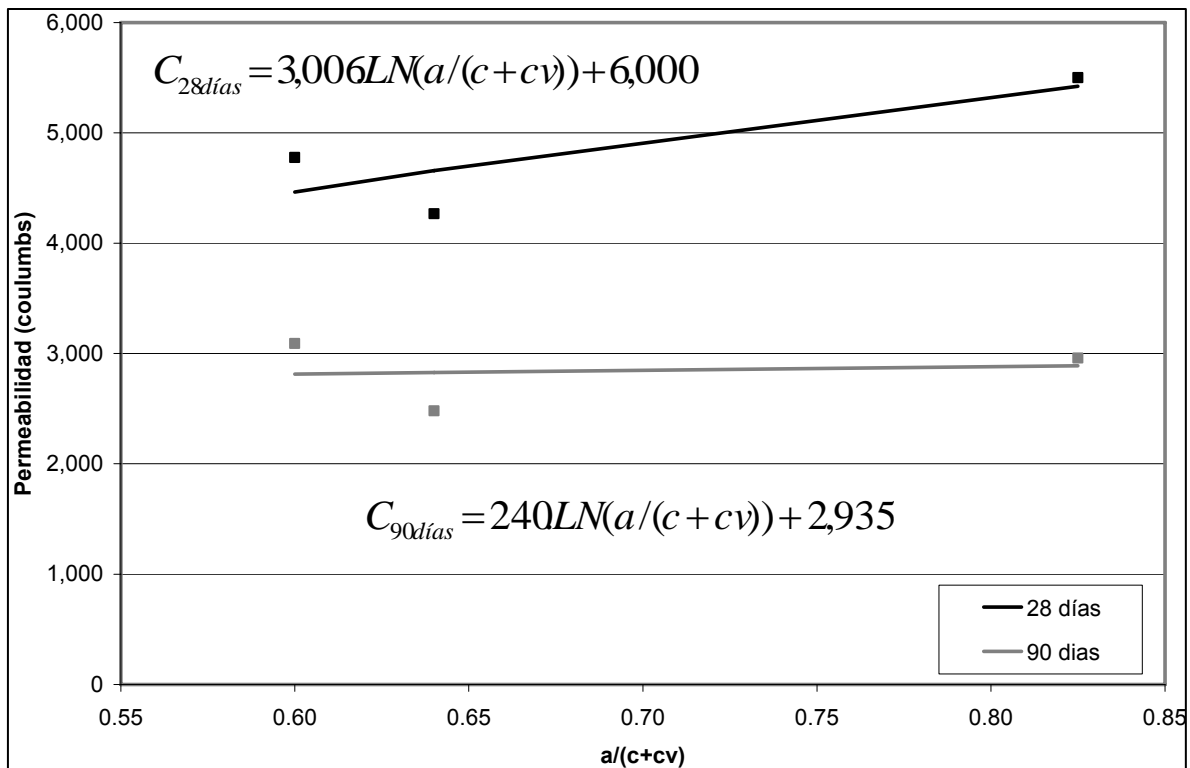


Fig. 5.32 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$ , mezclas de control con andesita.

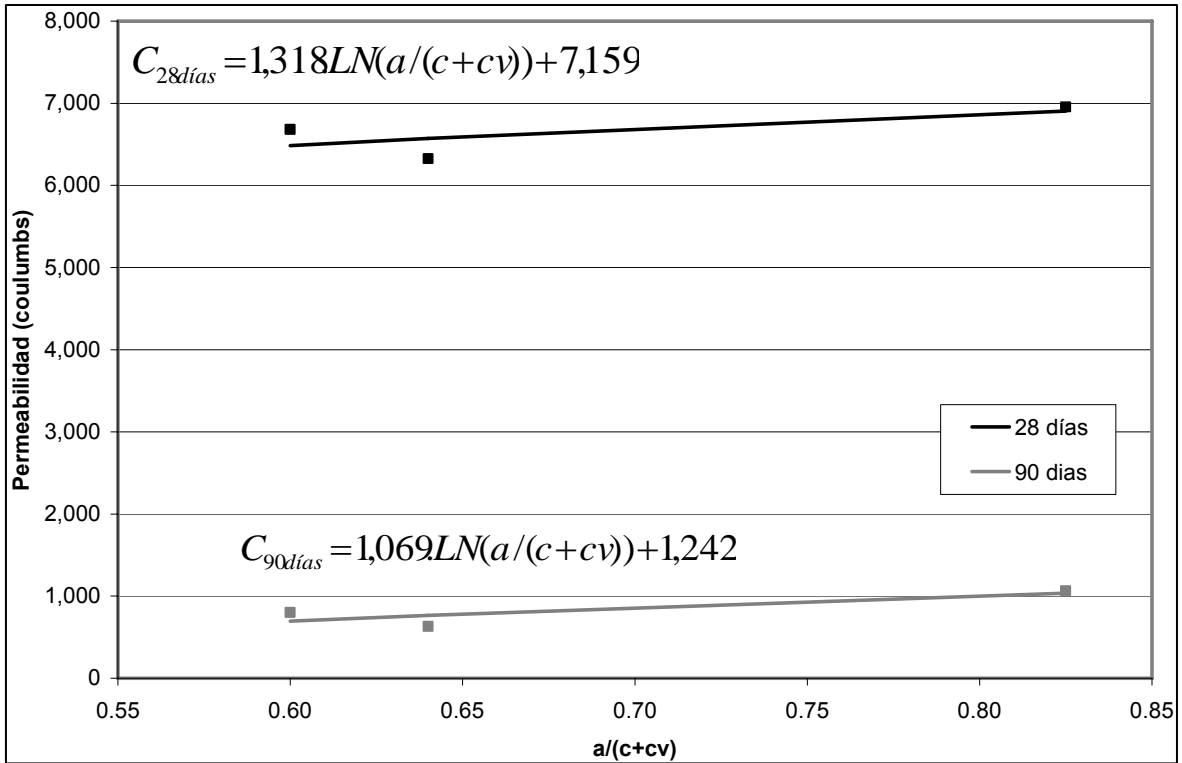


Fig. 5.33 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$ , mezclas con ceniza volante y andesita.

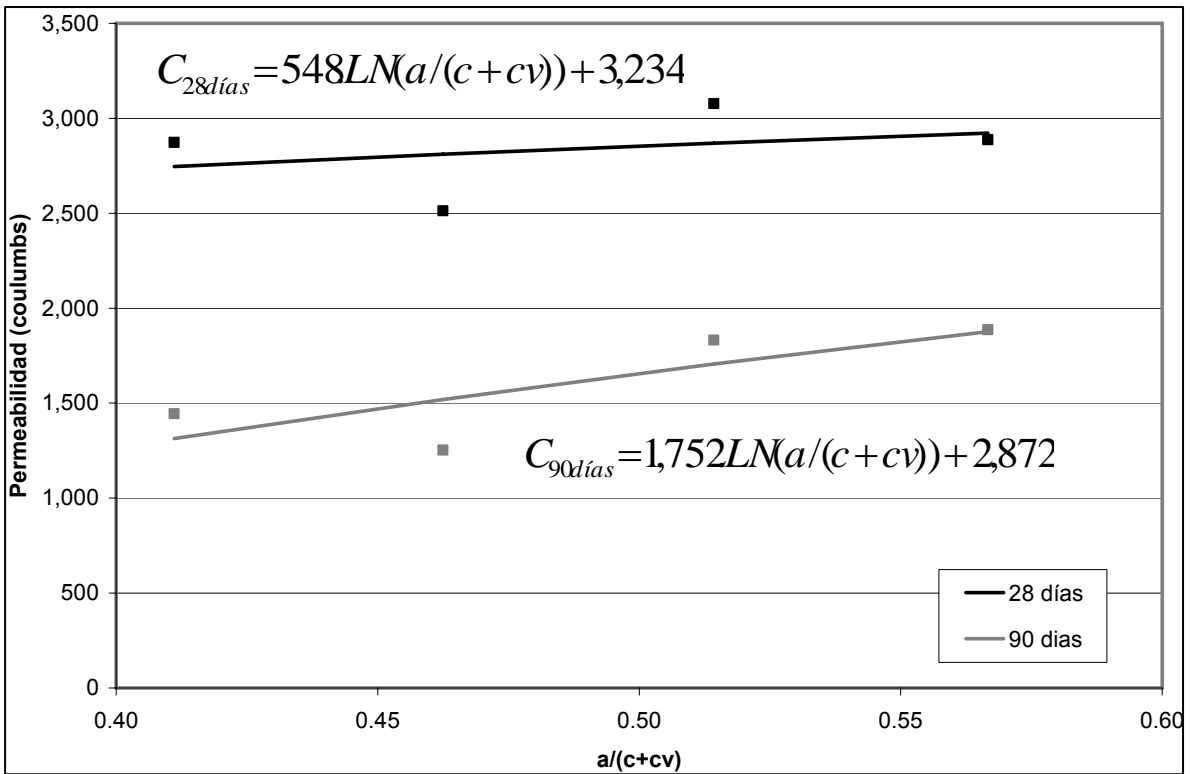


Fig. 5.34 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$ , mezclas de control con caliza.

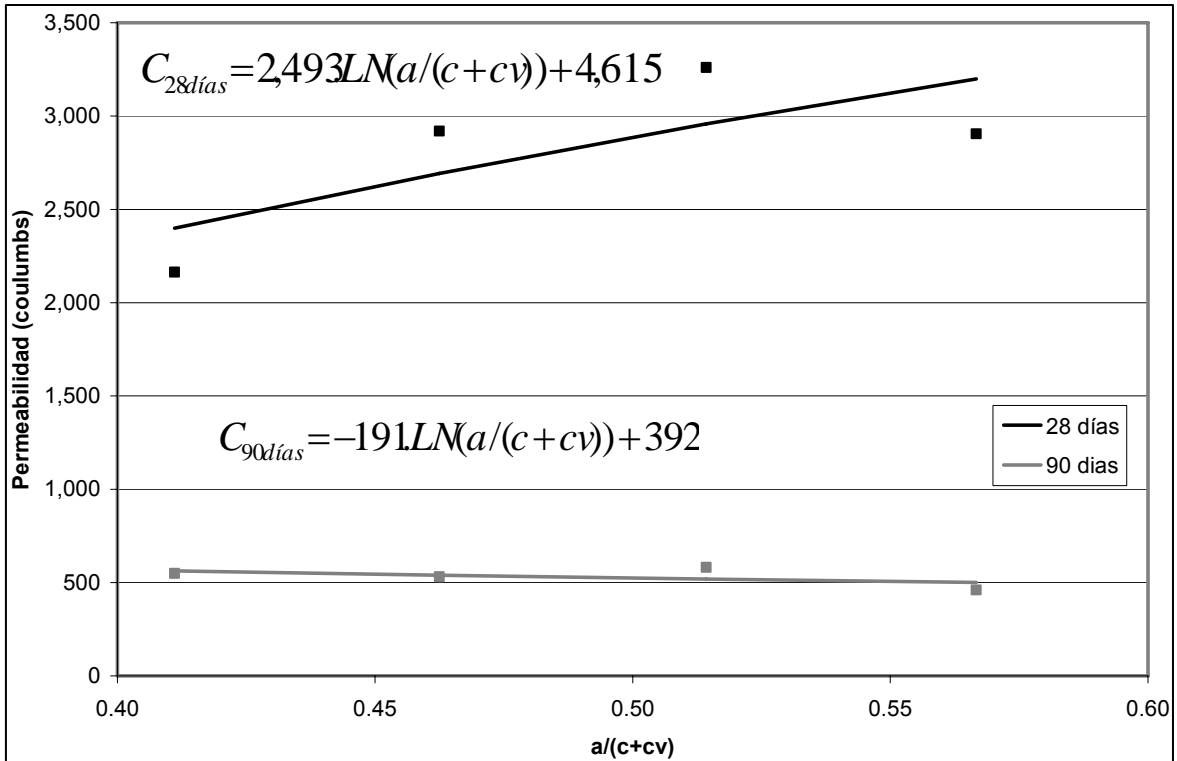


Fig. 5.35 Relación entre la permeabilidad y  $a/(c+cv)$ , mezclas con ceniza volante y caliza.

Como se ve en las gráficas la permeabilidad aumenta con la relación  $a/(c+cv)$ , excepto para las mezclas con ceniza volante y caliza a los 90 días, en donde podría decirse que casi se mantiene constante con la variación de la relación  $a/(c+cv)$ . Se nota también como varía esta expresión de 28 a 90 días debido a la disminución de la permeabilidad para todas las mezclas, en especial para las de ceniza volante.

### 5.9. Resistencia al ataque de sulfatos.

Con las lecturas hechas a diferentes edades se hallaron las curvas de ajuste para cada mezcla. En la tabla 5.52 se muestran los resultados ajustados de las expansiones unitarias debido al ataque de sulfatos, en la tabla 5.53 se han expresado estos resultados ajustados como un porcentaje de la mezcla de control y en la tabla 5.54 se expresan como un resultado de la expansión última de cada mezcla.

En la figura 5.36 se han graficado las expansiones últimas calculadas con las expresiones de ajuste.

Tabla 5.52 Resultados ajustados de las expansiones unitarias debido al ataque de sulfatos.

$\epsilon_t \times 10^{-6}$	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
(días)	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	415	497	377	412	423	492	210	354	255	436	264	316	315	214
14	528	538	473	479	535	543	287	382	341	478	325	342	344	252
28	612	561	542	522	617	572	350	398	409	503	368	357	360	276
91	687	578	604	557	689	594	414	410	475	521	405	368	373	296
105	692	579	608	559	694	595	418	411	480	522	407	369	374	298
$\epsilon_u$	727	586	636	574	727	604	450	416	512	529	423	373	379	306

Tabla 5.53 Resultados expresados como un porcentaje del valor obtenido en la mezcla de control.

Edad	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
(días)	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	100.0%	119.7%	100.0%	109.3%	100.0%	116.3%	100.0%	168.2%	100.0%	171.0%	100.0%	119.6%	100.0%	67.9%
14	100.0%	101.8%	100.0%	101.3%	100.0%	101.4%	100.0%	133.4%	100.0%	140.5%	100.0%	105.2%	100.0%	73.2%
28	100.0%	91.7%	100.0%	96.3%	100.0%	92.7%	100.0%	113.7%	100.0%	122.9%	100.0%	97.0%	100.0%	76.7%
91	100.0%	84.2%	100.0%	92.2%	100.0%	86.2%	100.0%	99.2%	100.0%	109.7%	100.0%	91.0%	100.0%	79.5%
105	100.0%	83.7%	100.0%	92.0%	100.0%	85.8%	100.0%	98.3%	100.0%	108.8%	100.0%	90.6%	100.0%	79.7%
$\epsilon_u$	100.0%	80.7%	100.0%	90.2%	100.0%	83.1%	100.0%	92.4%	100.0%	103.5%	100.0%	88.2%	100.0%	80.9%

Tabla 5.54 Resultados expresados como un porcentaje de la expansión unitaria última.

Edad	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7	
(días)	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA	C	HVFA
7	57.1%	84.7%	59.3%	71.8%	58.2%	81.4%	46.7%	85.1%	49.9%	82.4%	62.4%	84.6%	83.2%	69.9%
14	72.7%	91.7%	74.4%	83.6%	73.6%	89.8%	63.7%	91.9%	66.5%	90.4%	76.9%	91.7%	90.8%	82.3%
28	84.2%	95.7%	85.3%	91.1%	84.8%	94.6%	77.8%	95.8%	79.9%	94.9%	86.9%	95.7%	95.2%	90.3%
91	94.5%	98.6%	95.0%	97.1%	94.8%	98.3%	91.9%	98.7%	92.8%	98.4%	95.6%	98.6%	98.5%	96.8%
105	95.2%	98.8%	95.6%	97.5%	95.4%	98.5%	92.9%	98.8%	93.7%	98.6%	96.1%	98.8%	98.7%	97.2%
$\epsilon_u$	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

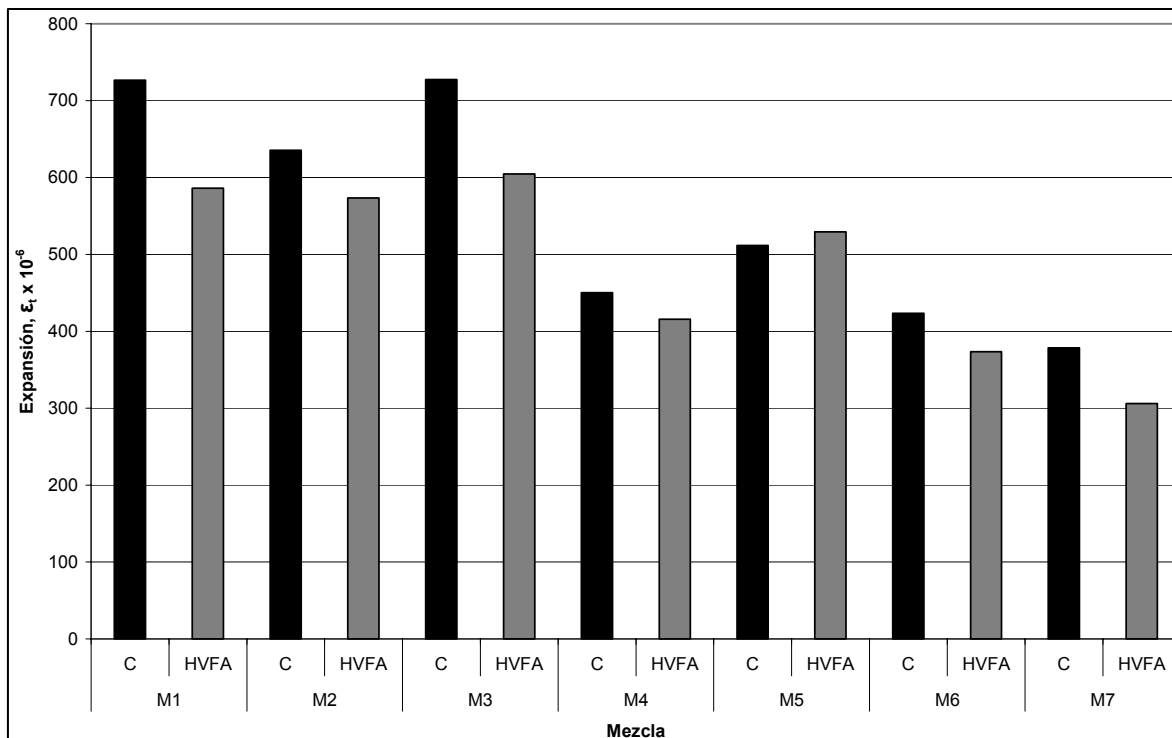


Fig. 5.36 Expansiones unitarias últimas debido al ataque de sulfatos.

En las tablas y en el gráfico se ve en general que las expansiones por el ataque de sulfatos son menores en las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de control. Las lecturas iniciales son mayores para las mezclas con ceniza volante pero estas disminuyen con el tiempo llegando a tener expansiones últimas menores en todas las mezclas con excepción de la mezcla M5. Esto puede explicarse en parte también a las menores permeabilidades de estas mezclas que hace más difícil el ingreso de los sulfatos.

Para las mezclas con andesita, las mezclas con ceniza volante tienen una expansión unitaria última de entre el 81% y 90% de la obtenida para su mezcla de control.

Para las mezclas con caliza, las mezclas con ceniza volante tienen una expansión unitaria última de entre el 81% y 104% de la obtenida en su mezcla de control.

También se ve una menor expansión debido al ataque de sulfatos en las mezclas con caliza en comparación con las mezclas de andesita, gracias a la menor permeabilidad de estas mezclas debido al tipo de agregado y a las menores relaciones  $a/(c+cv)$ .

En las tablas 5.55 a 5.58 se presentan las expresiones para predecir las expansiones debido al ataque de sulfatos.

Tabla 5.55 Expresiones para predecir la expansión por ataque de sulfatos en las mezclas de control con andesita.

Agregado	Mezcla		Relación a/(c+cv)	Expresiones de ajuste
Andesita	Cemento	M1 C200 GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{5.26 + t} \right) 727x10^{-6}$
		M2 C250 GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{4.81 + t} \right) 636x10^{-6}$
		M3 C300 GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{5.03 + t} \right) 727x10^{-6}$

Tabla 5.56 Expresiones para predecir la expansión por ataque de sulfatos en las mezclas con ceniza volante y andesita.

Agregado	Mezcla		Relación a/(c+cv)	Expresiones de ajuste
Andesita	Cemento - Ceniza	M1 HVFA200 GA	0.83	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.26 + t} \right) 586x10^{-6}$
		M2 HVFA250 GA	0.64	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{2.75 + t} \right) 574x10^{-6}$
		M3 HVFA300 GA	0.60	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.60 + t} \right) 604x10^{-6}$

Tabla 5.57 Expresiones para predecir la expansión por ataque de sulfatos en las mezclas de control con caliza.

Agregado	Mezcla		Relación a/(c+cv)	Expresiones de ajuste
Caliza	Cemento	M4 C300 GC	0.57	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{7.99 + t} \right) 450x10^{-6}$
		M5 C350 GC	0.51	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{7.04 + t} \right) 512x10^{-6}$
		M6 C400 GC	0.46	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{4.21 + t} \right) 423x10^{-6}$
		M7 C450 GC	0.41	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.41 + t} \right) 379x10^{-6}$

Tabla 5.58 Expresiones para predecir la expansión por ataque de sulfatos en las mezclas con ceniza volante y caliza.

Agregado	Mezcla	Relación a/(c+cv)	Expresiones de ajuste	
Caliza	Cemento - Ceniza	M4 HVFA300 GC	0.57	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.23 + t} \right) 416 \times 10^{-6}$
		M5 HVFA350 GC	0.51	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.49 + t} \right) 529 \times 10^{-6}$
		M6 HVFA400 GC	0.46	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{1.27 + t} \right) 373 \times 10^{-6}$
		M7 HVFA450 GC	0.41	$\varepsilon_t = \left( \frac{t}{3.01 + t} \right) 306 \times 10^{-6}$

En las figuras 5.37 y 5.38 se relacionan las expansiones por ataque de sulfatos con la relación a/(c+cv).

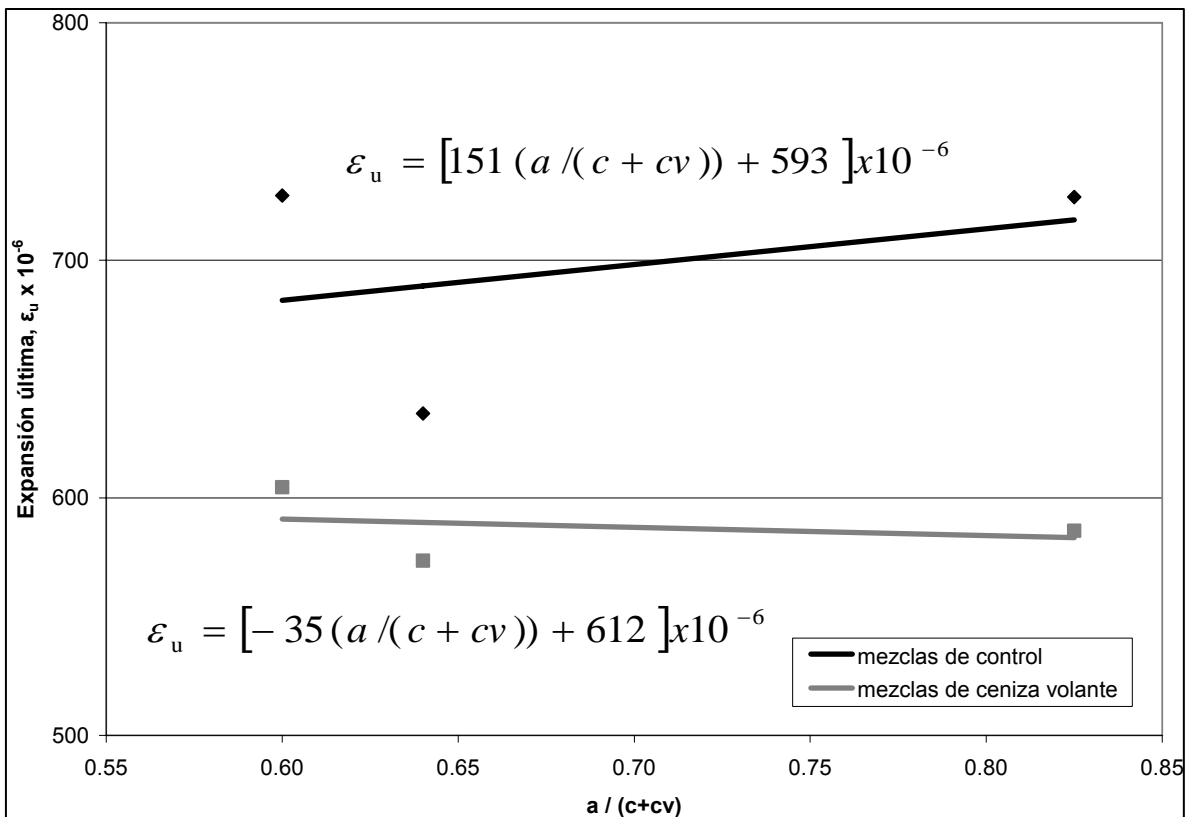


Fig. 5.37 Relación entre la expansión por ataque de sulfatos y la relación a/(c+cv) para las mezclas con andesita.



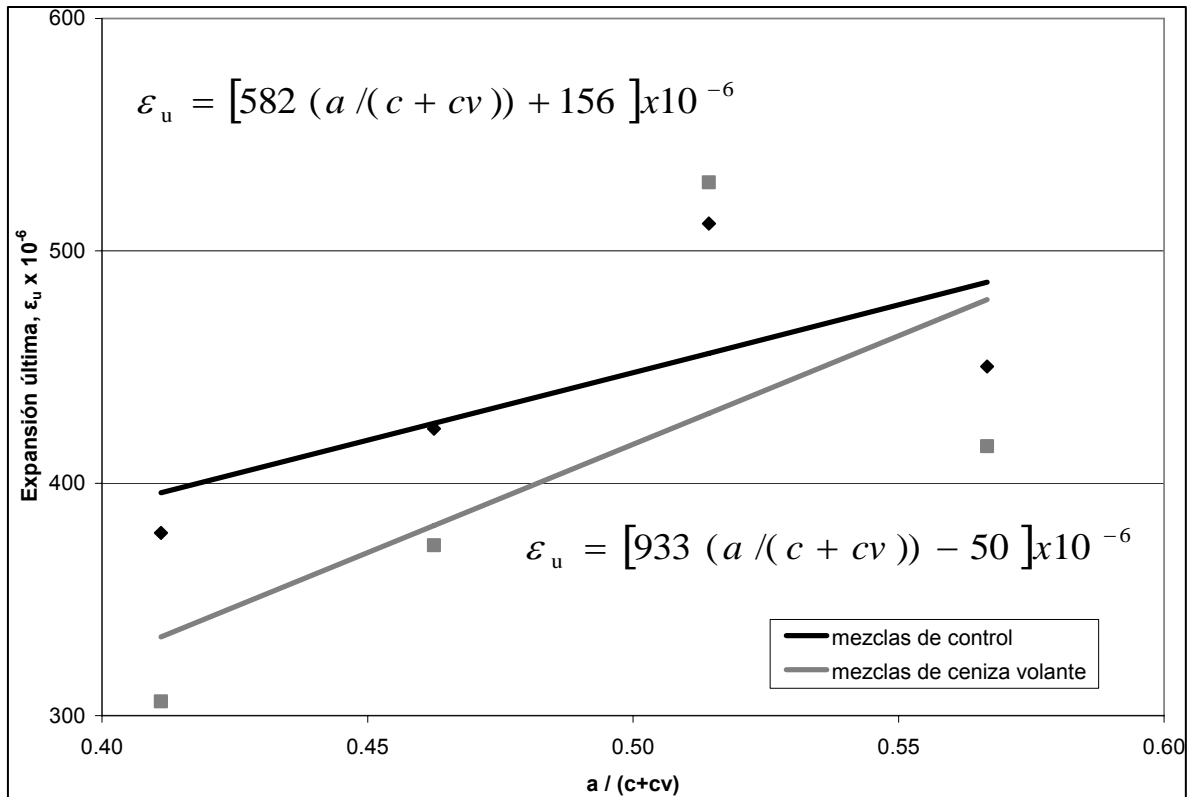


Fig. 5.38 Relación entre la expansión por ataque de sulfatos y la relación  $a/(c+cv)$  para las mezclas con caliza.

En las gráficas se ve que la expansión última aumenta con la relación  $a/(c+cv)$ , sólo para el caso de las mezclas con ceniza volante y andesita disminuye un poco con el aumento de la relación  $a/(c+cv)$ . En las mezclas con agregado calizo se ve que la mezcla M5 tiene valores altos en comparación con la tendencia del resto.

Al ver que la expansión por ataque de sulfatos aumenta con la relación  $a/(c+cv)$  se puede decir que lo que más influye en la resistencia al ataque de sulfatos es la permeabilidad antes que la cantidad de compuestos que pueden reaccionar con los sulfatos. Las mezclas con menores relaciones  $a/(c+cv)$  tienen mayores consumos de cemento, por lo que hay mayor cantidad de aluminato tricálcico para una posible reacción con los sulfatos, pero al tener una menor permeabilidad hace que el ingreso del sulfato sea más difícil, evitando o retrasando su ataque.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De los resultados del estudio experimental se puede ver que la ceniza volante no aumentó el revenimiento de las mezclas de concreto. En la mayoría de casos el revenimiento de las mezclas de concreto con ceniza volante fue menor al obtenido en sus respectivas mezclas de control.

Los concretos con ceniza volante son un poco más ligeros que los concretos de cemento pórtland, debido a una menor densidad de la ceniza en comparación con el cemento pórtland. Esto varía con el consumo de cemento y con el porcentaje de reemplazo de la ceniza volante. En las mezclas estudiadas los concretos con ceniza volante tuvieron una masa volumétrica que varía entre el 95% y 98% de la masa volumétrica de su mezcla de control.

Las mezclas de concreto con ceniza volante tienen una menor resistencia a compresión con respecto a sus mezclas de control, sobre todo a edades tempranas. Los porcentajes que alcanzaron con respecto a su mezcla de control fueron: a los 28 días, las mezclas con andesita 41% y las de caliza 60%; a los 90 días, las de andesita 60% y las de caliza 75%.

La ganancia de resistencia en el tiempo es mayor para las mezclas con ceniza volante, es por esto que a edades tardías (90 días) la resistencia a compresión de las mezclas con ceniza volante se acerca más a las de su mezcla de control. El porcentaje de resistencia a los 90 días con respecto a los 28 días para las mezclas de andesita es: para las mezclas de control 112%, para las de ceniza volante 165%; y para las mezclas de caliza: mezclas de control 111%, mezclas con ceniza volante 141%.

La ganancia de resistencia a los 90 días para las mezclas con ceniza volante es todavía muy alta, 165% para las mezclas de andesita y 141% para las mezclas con caliza, por lo que sería recomendable considerar para las mezclas de concreto con ceniza volante una edad de diseño mayor a los 28 días.

Las expresiones que predicen la resistencia a compresión en el tiempo son:

- Mezclas de control con andesita: 
$$f_c = \left( \frac{t}{3.13 + 0.8t} \right) f' c_{28 \text{ días}}$$
- Mezclas con ceniza volante y andesita: 
$$f_c = \left( \frac{t}{9.68 + 0.51t} \right) f' c_{28 \text{ días}}$$
- Mezclas de control con caliza: 
$$f_c = \left( \frac{t}{2.79 + 0.87t} \right) f' c_{28 \text{ días}}$$

- Mezclas con ceniza volante y caliza:

$$f_c = \left( \frac{t}{7.06 + 0.64t} \right) f'_c_{28 \text{ días}}$$

En las curvas relación  $a/(c+cv)$  vs resistencia a compresión no se ve una discontinuidad en los concretos con andesita y caliza por lo que podría usarse una sola curva sin distinción del tipo de agregado usado.

La resistencia a tensión esta muy ligada a la resistencia a compresión y sigue las mismas variaciones de ésta. Es menor en las mezclas con ceniza volante y tienen una mayor ganancia de resistencia en el tiempo en comparación con sus mezclas de control.

Las relaciones entre  $f_t$  y  $\sqrt{f'_c}$  para los 28 y 90 días por tipo de mezcla fueron:

Mezcla		$f_t / \sqrt{f'_c}$	
		28 días	90 días
Andesita	Cemento	1.28	1.45
Andesita	Cemento - Ceniza	1.10	1.32
Caliza	Cemento	1.70	1.79
Caliza	Cemento - Ceniza	1.42	1.48

La relación  $f_t / \sqrt{f'_c}$  aumenta con la edad y es menor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de sus mezclas de control. Se puede ver también que esta relación es mayor para las mezclas con caliza en comparación con las de andesita.

El módulo de elasticidad esta muy ligado a la resistencia a compresión y sigue las mismas variaciones de ésta. Es menor para las mezclas con ceniza volante y tiene una mayor razón de aumento con el tiempo en relación a sus mezclas de control.

Las relaciones entre  $E_c$  y  $\sqrt{f'_c}$  para los 28 y 90 días según el tipo de mezcla fue:

Mezcla		$E_c / \sqrt{f'_c}$	
		28 días	90 días
Andesita	Cemento	8,727	9,550
Andesita	Cemento - Ceniza	10,430	10,252
Caliza	Cemento	13,247	13,657
Caliza	Cemento - Ceniza	14,050	13,849

La relación  $E_c / \sqrt{f'_c}$  es mayor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de sus mezclas de control, también es mayor para las mezclas con caliza en comparación con las de andesita.

La relación  $E_c/\sqrt{f'c}$  varía de 28 a 90 días pero esta variación es mínima, por lo que podría considerarse un mismo factor  $E_c/\sqrt{f'c}$  para ambas edades, lo que hace notar que el aumento del módulo de elasticidad de 28 a 90 días se debe a un aumento en la resistencia a compresión.

La relación de Poisson  $\mu$  es menor para los concretos con ceniza volante en comparación con sus mezclas de control, y en ambos casos aumentan con la edad, siendo mayor la razón de aumento para las mezclas de concreto con ceniza volante.

Las expresiones que relacionan la relación de Poisson con la resistencia a compresión son:

- Mezclas de control con andesita:
  - 28 días:  $0.0087\sqrt{f'c} + 0.1033$
  - 90 días:  $0.0026\sqrt{f'c} + 0.2355$
- Mezclas con ceniza volante y andesita:
  - 28 días:  $0.0152\sqrt{f'c} + 0.0143$
  - 90 días:  $0.0066\sqrt{f'c} + 0.1538$
- Mezclas de control con caliza:
  - 28 días:  $0.0076\sqrt{f'c} + 0.1499$
  - 90 días:  $0.0043\sqrt{f'c} + 0.2163$
- Mezclas con ceniza volante y caliza:
  - 28 días:  $0.0074\sqrt{f'c} + 0.1501$
  - 90 días:  $0.0070\sqrt{f'c} + 0.1392$

Aunque hay una variación en las expresiones que relacionan la relación de Poisson  $\mu$ , con la resistencia a compresión  $f'c$  a los 28 y 90 días, éstas no son tan marcadas y se ve en las gráficas que estas pudieron haberse considerado sin distinción de edad, es decir tener una sola expresión que relacione la relación de Poisson con la resistencia a compresión en el tiempo.

La contracción por secado última es mayor para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de sus mezclas de control, y es mayor en las mezclas con andesita en comparación con las de caliza.

Los valores de contracción última por secado alcanzados fueron de:

- Mezclas con andesita:
  - Mezclas de control:  $748 \times 10^{-6} - 909 \times 10^{-6}$
  - Mezclas de ceniza volante:  $901 \times 10^{-6} - 1,029 \times 10^{-6}$
- Mezclas con caliza:
  - Mezclas de control:  $444 \times 10^{-6} - 583 \times 10^{-6}$
  - Mezclas de ceniza volante:  $502 \times 10^{-6} - 647 \times 10^{-6}$

El coeficiente de deformación diferida última resultó menor para las mezclas con ceniza volante ( $C_u = 2.96$ ) en comparación con las mezclas de control ( $C_u = 4.37$ ), esto representa aproximadamente el 68%.

La permeabilidad a los cloruros de las mezclas de concreto con ceniza volante fue mayor que las de sus mezclas de control a los 28 días, a los 90 días se redujeron las permeabilidades de ambos grupos de mezclas, siendo la razón de reducción mayor en las mezclas con ceniza volante llegando a tener menores permeabilidades que las de su mezcla de control a los 90 días, incluso cuando a esa edad la resistencia a compresión es menor. Las permeabilidades de las mezclas con caliza fueron menores a las de las mezclas con andesita.

La permeabilidad expresada en Coulombs obtenida para los diferentes grupos de mezclas a los 28 y 90 días fue:

- Mezclas de control con andesita:
  - 28 días: 4,266 – 5,501 (permeabilidad alta).
  - 90 días: 2,480 – 3,090 (permeabilidad moderada).
- Mezclas con ceniza volante y andesita:
  - 28 días: 6,327 – 6,955 (permeabilidad alta).
  - 90 días: 633 – 1,063 (permeabilidad muy baja).
- Mezclas de control con caliza:
  - 28 días: 2,512 – 3,077 (permeabilidad moderada).
  - 90 días: 1,253 – 1,887 (permeabilidad baja).
- Mezclas con ceniza volante y caliza:
  - 28 días: 2,164 – 3,260 (permeabilidad moderada).
  - 90 días: 461 – 582 (permeabilidad muy baja).

En general las expansiones últimas por ataque de sulfatos fueron menores para las mezclas con ceniza volante en comparación con las de su mezcla de control.

Las expansiones unitarias últimas por ataque de sulfatos que se obtuvieron para los diferentes grupos de mezclas fueron:


- Mezclas con andesita:
  - Mezclas de control:  $636 \times 10^{-6} - 727 \times 10^{-6}$
  - Mezclas con ceniza volante:  $574 \times 10^{-6} - 604 \times 10^{-6}$
- Mezclas con caliza:
  - Mezclas de control:  $379 \times 10^{-6} - 512 \times 10^{-6}$
  - Mezclas con ceniza volante:  $306 \times 10^{-6} - 529 \times 10^{-6}$

En general se ve que las expansiones últimas por ataque de sulfatos aumentan con la relación  $a/(c+cv)$ , cuando en nuestro estudio las mezclas con menores relaciones  $a/(c+cv)$  tienen mayores consumos de cementantes, es decir que se tienen menores expansiones últimas por ataque de sulfatos para mezclas con mayores consumos de cementantes. Esto nos indica que la permeabilidad de las mezclas influye mucho en las expansiones por ataque de sulfatos, al hacer más difícil su ingreso.

## ANEXOS

A1. Ensayos químicos de la ceniza volante.	II
A2. Ensayos químicos del cemento.	III
A3. Especificaciones técnicas Pozzolith 322 N.	IV
A4. Especificaciones técnicas Glenium 3030 NS.	VI
A5. Datos de pruebas del ensayo a compresión.	VIII
A6. Datos de pruebas del ensayo a tensión indirecta por compresión diametral.	XI
A7. Curvas de contracción por secado.	XIII
A8. Curvas de expansiones por ataque de sulfatos.	XVI
A9. Ejemplos de hojas de resultados de ensayos de permeabilidad.	XX

A1. Ensayos químicos de la ceniza volante.



**imcyc**

**Instituto Mexicano del  
Cemento y del Concreto, A. C.**  
Constitución 50  
Colón a Escandón  
C. P. 11800 México, D. F.

Tel: 01 55 5322 5740  
5276 7200, 5662 0606  
Fax: 01 55 5276 7210  
E: imcyc@mail.imcyc.com  
www.imcyc.com


<b>PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE PUZOLANAS</b>				
Orden de Trabajo No. 773	Informe Técnico No. 289/2005	Hoja No. 3 de 3		
Cliente INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM				
Muestra No. Q745 -CENIZA DE LA CARBOELECTRICA DE CFE				
<b>Resultados obtenidos</b>				
<b>Requerimientos químicos</b>	<b>%</b>	<b>Especificación</b>		
		<b>Clase F</b>	<b>Clase N</b>	<b>Clase C</b>
		<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
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 %	<u>92.2</u>	70	70	50
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), max %	<u>0.2</u>	5.0	4.0	5.0
Pérdida por calcinación, max %	<u>2.9</u>	6.0	10.0	6.0
Humedad, max %	<u>0.5</u>	3.0	3.0	3.0
Alcalis disponibles (Na <sub>2</sub> O), max %	<u>3.7</u>	1.5	1.5	1.5
<b>Requerimientos físicos</b>				
Índice de actividad puzolánica mínimo % del control a 7 días	<u>-</u>	75	75	75
Índice de actividad puzolánica mínimo % del control a 28 días	<u>-</u>	75	75	75
Expansión en autoclave, max %	<u>-</u>	0.8	0.8	0.8
Densidad g/cm <sup>3</sup>	<u>-</u>	-	-	-
Observaciones	Los resultados son únicamente para la muestra recibida.			
	El muestreo y procedencia fue responsabilidad del			
	IMCYC ( ) CLIENTE ( X )			
Referencias	ASTM-C-618 EN 196-2			
Realizó: Alejandro Peña Barrientos Técnico Laboratorio Cemento	Revisó: Ing. David José Morales Jefe Laboratorio Cemento	Fecha de elaboración: 2006-01-20		

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización escrita del IMCYC A.C.  
Los resultados de este informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) ensayada(s)  
Fig-027 rev

FIG-GT-LCE-027  
Versión 07



A2. Ensayos químicos del cemento.



**imcyc**

Instituto Mexicano del  
Cemento y del Concreto, A. C.  
Constitución 50  
Colonia Escandón  
C. P. 06000 México, D. F.

T (01 55) 5322 5740  
5276 7200 5662 0606  
F (01 55) 5276 7210  
E imcyc@mail.imcyc.com  
www.imcyc.com

PRUEBAS FISICAS Y QUIMICAS DE CEMENTO						
Orden de Trabajo No.		773		Informe Técnico No.		289/2005
Hoja No.		2		de		3
Cliente			INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM		Precisión	Precisión
Muestra No.			Q744 -CEMENTO CPO 30R		Laboratorio	Inter Laboratorios
					ESPECIFICACION	
					NMX-C-414 CPO	
P	Consistencia normal,	% de agua		-	-	-
R	Tiempo de fraguado	Inicial	min	-	34 min	45 min
U	Vicat y/o Gillmore	Final	min	-	56 min	122 min
E	Finura en	No. 200	% pasa	-	-	-
B	%	No. 130 M	% pasa	-	-	-
A	Sup. específica, Blaine	m <sup>2</sup> /kg		-	-	-
S	Contenido de aire en el Mortero	%		-	-	-
	Sanidad: Expansión o contracción en autoclave	%		-	-	-
F	Fraguado falso: Penetración final	%		-	-	-
I	Resistencia a la compresión	A 24 horas	MPa	-	-	-
S		A 3 días	MPa	-	-	-
I		A 7 días	MPa	-	-	-
C		A 28 días	MPa	-	-	-
A		Relación A/C			-	-
S	Fluidez	%		-	-	-
Análisis Químico	SiO <sub>2</sub> - Silice	%		19,2	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Alúmina	%		5,3	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Oxido férrico	%		3,2	-	-
	Ca O - Cal combinada	%		62,9	-	-
	Ca O - Cal libre	%		0,3	-	-
	MgO - Magnesio	%		1,2	-	-
	S O <sub>2</sub> - Tróxido de azufre	%		3,1	-	4,0 MAXIMO
	Residuo Insoluble	%		0,77	-	5,0 MAXIMO
	Pérdida por calcinación	%		3,0	-	5,0 MAXIMO
	Suma			98,97	-	-
Compuestos potenciales	Na <sub>2</sub> O - Oxido de sodio	%		0,32	-	-
	K <sub>2</sub> O - Oxido de potasio	%		0,47	-	-
	Total de álcalis (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O)	%		0,53	-	-
	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	-	-	
Suma			93,15	-	-	
Observaciones:	Los resultados son únicamente para la muestra recibida.					
	El muestreo y procedencia de éste cemento fue responsabilidad del IMCYC ( ), CLIENTE ( X )					
Precisión:	El resultado de dos pruebas adecuadamente realizadas, no debe diferir en los valores listados.					
Referencias	ASTM-C-150 EN 12593					
Realizó:	Alejandro Barrera Barrientos Técnico Laboratorio Cemento		Revisó:	Ing. David Ortiz Morales Jefe Laboratorio Cemento		Fecha de elaboración: 2006-01-20

Prohíbase la reproducción total o parcial de este documento, sin la autorización escrita del IMCYC.  
Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) ensayada(s)  
Fig-002

FIG-GTLCB-002  
Versión 05

## A3. Especificaciones técnicas Pozzolith 322 N.

**degussa.**

creating essentials

# POZZOLITH® 322N

Aditivo reductor de agua para concreto

### USOS RECOMENDADOS

- Concreto pretensado y prefabricado
- Concreto reforzado
- Shotcrete via húmeda
- Concreto ligero y de peso normal
- Concreto bombeado

### DESCRIPCION

POZZOLITH 322N es un aditivo líquido listo para usarse y obtener un concreto más uniforme y de calidad predecible.

### VENTAJAS

- Cumple con la especificación ASTM C 494 para aditivos reductores de agua tipo A
- Durabilidad relativa al daño por los ciclos de congelación y deshielo – muy superior a los estándares de la industria.
- Reduce el contenido de agua requerido para una manejabilidad determinada
- Características de fraguado normales
- Menor segregación
- Características de terminado superiores para superficies planas y encofradas

### CARACTERISTICAS DE DESEMPEÑO

Datos de la Mezcla **POZZOLITH® 322 N**

Cemento Tipo I, kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )	237 (400)
Asentamiento, mm(in)	125 (5)
Contenido de aire, %	Concreto sin aire incluido
Temperatura concreto	24°C (76°F)
Temperatura ambiente	23°C (74°F)

### Tiempo de fraguado(1)

Mezcla	Fraguado	
	Hr: Min	Hr: Min
Concreto normal	5:20	-
<b>POZZOLITH 322N</b>		
<b>195 ml/100 kg</b> (3 oz fl/100 lb)	5:15	-0:05
<b>325 ml/100 kg</b> (5 oz fl/100 lb)	5:40	+0:20
<b>460 ml/100 kg</b> (7 oz fl/100 lb)	6:20	+1:00

### Resistencia a Compresión (1)

Mezcla	7 días		28 días	
	MPa	(psi)	MPa	(psi)
<b>Normal</b>	14.8 MPa	(2150 psi)	21.2 MPa	(3070 psi)
	100 %		100 %	
<b>POZZOLITH 322N</b>				
<b>195 ml/100 kg</b> (3 oz fl/100 lb)	19.4 MPa	(2820 psi)	27.4 MPa	(3970 psi)
	131 %		129 %	
<b>325 ml/100 kg</b> (5 oz fl/100 lb)	21.8 MPa	(3160 psi)	28.3 MPa	(4100 psi)
	147 %		134 %	
<b>460 ml/100 kg</b> (7 oz fl/100 lb)	22.0 MPa	(3190 psi)	30.3 MPa	(4390 psi)
	148 %		143 %	

(1) Los datos mostrados están basados en pruebas de laboratorio controladas. Se pueden experimentar variaciones razonables de los resultados aquí mostrados como resultado de las diferencias en los materiales de manufactura del concreto y en las condiciones de la obra.

El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto y las condiciones climáticas. Las mezclas de prueba deben

Construction Chemicals



hacerse con los materiales de la obra para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y un requerimiento de resistencia determinado.

## APLICACION

### Dosificación

El rango de dosificación recomendado para el POZZOLITH® 322 N es de 195-460 ml/100 kg (3-7 oz fl/100 lb) de cemento para la mayoría de las mezclas de concreto que usan ingredientes ordinarios de concreto. Debido a las variaciones en las condiciones de la obra y de los materiales de concreto, se podrán requerir rangos de dosificación diferentes a los recomendados. En tales casos, contacte a su representante de Degussa.

## RECOMENDACIONES

### Corrosividad

No corrosivo, no contiene cloruros

POZZOLITH 322 N no iniciará o promoverá la corrosión del acero reforzado en el concreto. Este aditivo no contiene cloruro de calcio o ingredientes a base de cloruros que hayan sido adicionados intencionalmente.

### Compatibilidad

POZZOLITH 322 N puede utilizarse en combinación con cualquier otro aditivo de Degussa Construction Chemicals y puede usarse en concreto todo blanco, de color o concreto arquitectónico. Cuando se usa con otros aditivos, cada aditivo deberá adicionarse a la mezcla en forma separada.

### Temperatura

Si se llega a congelar el POZZOLITH 322 N, funda a 2°C (35°F) o a una temperatura mayor y reconstituya el producto por completo con una agitación mecánica ligera. No use aire presurizado para agitar.

## ALMACENAMIENTO

POZZOLITH 322 N tiene una vida útil de 18 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

## EMPAQUE

POZZOLITH 322 N se suministra en tambores de 208 l (55 gal), en tanques de 1040 l (275 gal) y a granel.

## SEGURIDAD

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto

Para información adicional sobre este producto consulte a su representante local de Degussa.

### EXENCIÓN DE RESPONSABILIDADES

#### AVISO DE GARANTÍA LIMITADA

Degussa ha realizado todos los esfuerzos posibles para aplicar los estándares exactos tanto en la fabricación de nuestros productos como en la información que emitimos con respecto a los mismos y a su uso. Garantizamos que nuestros productos son de buena calidad y reemplazaremos o, a voluntad, reembolsaremos el precio de compra de cualquier producto que resulte defectuoso. Los resultados satisfactorios dependen no sólo de la calidad de los productos sino de muchos factores que escapan a nuestro control. Por lo tanto, excepto dicho reemplazo o reembolso, Degussa NO DA GARANTÍAS, EXPRESAS O IMPLÍCITAS, INCLUYENDO GARANTÍAS DE ADAPTACIÓN A UN FIN DETERMINADO O DE LA COMERCIABILIDAD DE SUS PRODUCTOS, no teniendo Degussa en el futuro ninguna otra responsabilidad con respecto a ello. Cualquier reclamo con respecto a un defecto del producto debe ser recibido por escrito dentro del año de la fecha de envío. No se considerarán reclamos sin dicho aviso escrito o después de la fecha especificada. El usuario determinará a su exclusivo criterio la conveniencia de los productos para el uso de que se trate y asume todo riesgo y responsabilidad en relación con ello. Todo cambio autorizado en las recomendaciones impresas con respecto al uso de nuestros productos debe llevar la firma del Gerente Técnico de Degussa.

Esta información y todo otro aviso técnico se basan en la real experiencia y conocimiento de Degussa. Sin embargo, Degussa no asume responsabilidad por el suministro de dicha información y avisos incluso en la medida en que dicha información y avisos pueden relacionarse con derechos de propiedad intelectual existentes de terceros. En particular, Degussa se exime de toda GARANTÍA, SEA EXPRESA O IMPLÍCITA, INCLUYENDO LA GARANTÍA IMPLÍCITA DE ADAPTACIÓN A UN FIN DETERMINADO O COMERCIABILIDAD. DEGUSSA NO SERÁ RESPONSABLE POR DAÑOS DIRECTOS O INDIRECTOS O DE CUALQUIER OTRA NATURALEZA (INCLUYENDO PÉRDIDA DE BENEFICIOS DE CUALQUIER TIPO). Degussa se reserva el derecho de realizar cambios de acuerdo con el progreso tecnológico o ulteriores desarrollos. Es responsabilidad y obligación del cliente inspeccionar cuidadosamente y probar toda mercadería que reciba. El rendimiento de los productos aquí detallados debe ser verificado con pruebas y llevadas a cabo sólo por personal calificado. Es responsabilidad única del cliente llevar a cabo y establecer todo tipo de pruebas. La referencia a marcas utilizadas por otras empresas no es recomendación ni respaldo de producto alguno y no implica que pueda utilizarse ningún producto similar.

### Degussa Construction Chemicals Latin America

Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Costa Rica	Ecuador	México	Perú	Puerto Rico	Rep Dominicana	Venezuela
(54-34-8843-3000)	(55-11-6108-5555)	(56-2-444-9760)	(57-1-321-7210)	(506-440-9110)	(593-2-256-6011)	(52-55-2122-2200)	(511-365-0109)	(787-258-2737)	(809-957 9303)	(58-212-762-5471)

## A4. Especificaciones técnicas Glenium 3030 NS.



The Chemical Company

### **GLENIUM® 3030 NS**

Aditivo reductor de agua de rango completo para concreto

#### USOS RECOMENDADOS

- Concreto donde se requiera alta fluidez, resistencias iniciales y finales altas y mejor durabilidad
- Producción de mezclas de concreto autocompactante RHEODYNAMIC. (Se producen usando un aditivo reductor de agua de alto rango GLENIUM® y RHEOMAC• VMA aditivo modificador de viscosidad)
- Concreto donde se desea una reducción de agua en un rango normal, medio o alto.
- Concreto donde se requieran tiempos de fraguado normales
- Concreto donde se requiera el desarrollo rápido de resistencias y mejor terminado
- Concreto 4 x 4™.

#### DESCRIPCION

GLENIUM 3030 NS es un aditivo reductor de agua de rango completo listo para usarse, pertenece a una nueva generación de aditivos patentados basados en la tecnología del policarboxilato. Es muy efectivo en la producción de cemento con diferentes niveles de manejabilidad, incluyendo aplicaciones que requieren el uso de Concreto Autocompactante RHEODYNAMIC™.

#### VENTAJAS

- Cumple con la especificación ASTM C 494 para aditivos reductores de agua tipo A y aditivos reductor de agua de alto rango, Tipo F.

- Menor contenido de agua para un asentamiento determinado
- Reducción lineal de agua en todo el rango de dosis recomendado
- Produce mezclas de concreto cohesivas y sin segregación
- Incremento en el desarrollo de resistencias a compresión y a flexión durante en todas las etapas
- Menor tiempo de fraguado y para el desarrollo de la resistencia
- Mejor acabado y capacidad de bombeo
- Beneficios económicos en la construcción debido a una mayor productividad y reducción en costos variables

#### CARACTERISTICAS DE DESEMPEÑO

##### Datos de la Mezcla - GLENIUM 3030 NS

Cemento Tipo 1.kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )	360 (600)
Asentamiento, mm(in)	210-235 (8.5-9.25)
Contenido de aire, %	Sin aire oduido
Reducción de agua, dosis de aditivo ajustada	25-30%

##### Tiempo de fraguado

Mezcla		Fraguado (Hr: Min)	
		Inicial	Diferencia
Concreto normal, o referencia	4:24	-	
Superplastificante convencional	6:00	+1:36	
GLENIUM 3030 NS	5:00	+0:36	

##### Resistencia a compresión

Mezcla	1 día		7 días	
	MPa	psi	MPa	psi
Normal	12 MPa	(1700 psi)	28 MPa	(4040 psi)
Superplastificante convencional	24 MPa	(3460 psi)	44 MPa	(6380 psi)
GLENIUM 3030 NS	28 MPa	(4120 psi)	52 MPa	(7580 psi)







The Chemical Company

#### Retención de Asentamiento

Mezcla	15 min	30 min	45 min
Normal	215 mm (8.5 in)	215 mm (8.5 in)	200 mm (7.5 in)
Superplastificante convencional	215 mm (8.5 in)	110 mm (4.25 in)	90 mm (3.5 in)
GLENIUM 3030 NS	236 mm (9.25 in)	235 mm (9.25 in)	210 mm (8.25 in)

#### Velocidad de Fraguado

GLENIUM® 3030 NS ha sido formulado para producir características de fraguado normales en todo el rango de dosificación recomendada. Los tiempos de fraguado del concreto dependen de la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, temperatura del concreto y condiciones ambientales. Deberán realizarse mezclas de prueba con materiales reales de producción para determinar la dosificación que se requiere para un tiempo de fraguado especificado y una resistencia dada.

Nota: Los datos mostrados están basados en pruebas de laboratorio controladas. Se pueden experimentar variaciones razonables de los resultados aquí mostrados como resultado de las diferencias en los materiales de manufactura del concreto y en las condiciones de la obra.

#### APLICACION

##### Dosificación

El rango de dosificación recomendado para el aditivo superplastificante GLENIUM 3030 NS es de 195ml/100 kg (3 oz fl/100 lb) de cemento para aplicaciones Tipo A, 195ml-390 ml/100 kg (3 –6 oz fl/100 lb) de cemento para aplicaciones con reducción de agua de medio rango y hasta de 1170/100 kg (18 oz fl/100 lb) de cemento para aplicaciones Tipo F. El rango de

dosificación aplica a la mayoría de las mezclas de concreto usando ingredientes ordinarios de concreto. Sin embargo, debido a las variaciones de las condiciones de la obra y de los materiales de concreto como la microsilica, se podrán requerir rangos de dosificación diferentes a los recomendados. En tales casos, contacte a su representante local de BASF Construction Chemicals.

##### Mezclado

A diferencia de los aditivos reductores de agua de alto rango, GLENIUM 3030 NS puede adicionarse con el agua inicial de mezclado o agregarse después hasta que el agua final se adicione a la mezcla.

#### RECOMENDACIONES

##### Corrosividad

No corrosivo, No contiene cloruros

GLENIUM 3030 NS no iniciará o promoverá la corrosión del acero reforzado en el concreto, concreto pretensado o concreto colocado en sistemas de pisos y techos de acero galvanizado. No se usó cloruro de calcio ni ingredientes base cloruros en la manufactura de GLENIUM 3030 NS.

#### Compatibilidad

No use el aditivo GLENIUM 3030 NS con aditivos base naftaleno. Se pueden experimentar comportamientos erráticos en el asentamiento o movimiento del asentamiento. Para instrucciones sobre la evaluación adecuada del aditivo GLENIUM 3030 NS en aplicaciones específicas, contacte a su representante local de BASF Construction Chemicals.

##### Temperatura

Si se llega a congelar el GLENIUM 3030 NS, funda a 7°C (45°F) o a una temperatura mayor y reconstituya el producto por completo con una agitación mecánica ligera. No use aire presurizado para agitar.

#### ALMACENAMIENTO

GLENIUM 3030 NS tiene una vida útil de 12 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

#### EMPAQUE

GLENIUM 3030 NS se suministra en paílas de 11 l (3 gal), tambores de 208 l (55 gal), bolsas de 1040 l (275 gal) y a granel.

#### SEGURIDAD

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto.

Para información adicional sobre este producto o para su uso en el desarrollo de mezclas de concreto con características especiales de desempeño, consulte a su representante de BASF Construction Chemicals.

#### BASF Construction Chemicals, LLC

Argentina (54-34-8843-3000) Brasil (55-11-6108-5555) Chile (56-2-444-9760) Colombia (57-1-321-7210) Costa Rica (506-440-9110) Ecuador (593-2-256-6011) México (52-55-2122-2200) Perú (51-385-0109) Puerto Rico (787-621-1700) Rep Dominicana (809-957-9303) Venezuela (58-2-12-762-5471)

© Marca registrada de BASF Aktiengesellschaft  
© 2007 BASF Construction Chemicals, LLC

08/06  
Glenium3030NS.pmd

[www.basf-cc-la.com](http://www.basf-cc-la.com)

A5. Datos de pruebas del ensayo a compresión.

	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	M4 C300 GC	31/10/2006	C7-C1	7	12.570	15.10	30.30	55,300	2,317	308.80
2	M4 C300 GC	31/10/2006	C7-C2	7	12.560	15.20	30.30	56,100	2,284	309.16
3	M4 C300 GC	31/10/2006	C7-C3	7	12.480	15.20	30.40	58,100	2,262	320.18
4	M4 C300 GC	31/10/2006	C14-C1	14	12.873	15.40	30.30	62,100	2,281	333.40
5	M4 C300 GC	31/10/2006	C14-C2	14	12.212	15.10	29.80	62,200	2,288	347.33
6	M4 C300 GC	31/10/2006	C14-C3	14	12.645	15.20	30.20	62,600	2,307	344.98
7	M4 C300 GC	31/10/2006	C28-C1	28	13.033	15.30	30.60	67,900	2,317	369.31
8	M4 C300 GC	31/10/2006	C28-C2	28	14.378	15.90	31.60	77,400	2,292	389.81
9	M4 C300 GC	31/10/2006	C28-C3	28	12.714	15.10	30.40	63,100	2,335	352.36
10	M4 C300 GC	31/10/2006	C90-C1	90	12.766	15.20	30.30	75,600	2,322	416.62
11	M4 C300 GC	31/10/2006	C90-C2	90	14.336	15.80	31.50	60,200	2,321	307.04
12	M4 C300 GC	31/10/2006	C90-C3	90	12.634	15.20	30.30	78,800	2,298	434.26
13	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C7-C1	7	14.005	16.00	31.50	29,900	2,211	148.71
14	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C7-C2	7	12.340	15.20	30.20	28,100	2,252	154.86
15	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C7-C3	7	12.285	15.20	30.00	24,800	2,257	136.67
16	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C14-C1	14	14.130	15.90	31.60	36,800	2,252	185.34
17	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C14-C2	14	12.330	15.10	30.40	35,600	2,265	198.79
18	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C14-C3	14	12.360	15.10	30.40	35,200	2,270	196.56
19	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C28-C1	28	12.515	15.40	30.30	38,300	2,217	205.62
20	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C28-C2	28	12.293	15.20	30.20	37,900	2,243	208.86
21	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C28-C3	28	12.303	15.20	30.30	39,400	2,238	217.13
22	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C90-C1	91	12.368	15.10	30.40	60,700	2,272	338.96
23	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C90-C2	91	14.221	15.90	31.50	66,100	2,274	332.90
24	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	C90-C3	91	12.362	15.20	30.30	60,100	2,248	331.20
25	M5 C350 GC	09/11/2006	C7-C1	7	14.472	15.90	31.70	73,500	2,299	370.17
26	M5 C350 GC	09/11/2006	C7-C2	7	12.645	15.20	30.50	57,100	2,285	314.67
27	M5 C350 GC	09/11/2006	C7-C3	7	12.559	15.20	30.40	62,400	2,277	343.88
28	M5 C350 GC	09/11/2006	C14-C1	14	12.712	15.10	30.40	72,500	2,335	404.85
29	M5 C350 GC	09/11/2006	C14-C2	14	12.612	15.10	30.40	63,300	2,317	353.48
30	M5 C350 GC	09/11/2006	C14-C3	14	12.692	15.10	29.90	73,300	2,370	409.32
31	M5 C350 GC	09/11/2006	C28-C1	28	12.632	15.20	30.30	80,400	2,297	443.08
32	M5 C350 GC	09/11/2006	C28-C2	28	12.578	15.20	30.40	69,600	2,280	383.56
33	M5 C350 GC	09/11/2006	C28-C3	28	12.656	15.20	30.40	78,500	2,294	432.61
34	M5 C350 GC	09/11/2006	C90-C1	91	14.480	15.90	31.70	95,600	2,301	481.47
35	M5 C350 GC	09/11/2006	C90-C2	91	14.454	15.90	31.70	88,000	2,296	443.20
36	M5 C350 GC	09/11/2006	C90-C3	91	12.920	15.50	30.30	53,800	2,260	285.12
37	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C7-C1	7	12.286	15.20	30.40	35,300	2,227	194.53
38	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C7-C2	7	12.235	15.40	30.40	36,800	2,161	197.57
39	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C7-C3	7	13.898	15.90	30.50	38,700	2,295	194.91
40	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C14-C1	14	12.283	15.20	30.60	39,500	2,212	217.68
41	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C14-C2	14	12.248	15.20	30.40	41,800	2,220	230.36
42	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C14-C3	14	12.220	15.20	30.40	40,900	2,215	225.40
43	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C28-C1	29	14.030	16.00	31.60	50,200	2,208	249.67
44	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C28-C2	29	12.522	15.50	30.40	48,000	2,183	254.38
45	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C28-C3	29	12.225	15.20	30.50	45,100	2,209	248.54
46	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C90-C1	91	12.348	15.20	30.40	64,100	2,238	353.25
47	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C90-C2	91	12.527	15.50	30.30	67,100	2,191	355.61
48	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	C90-C3	91	14.064	15.90	31.70	72,100	2,234	363.12
49	M3 C300 GA	16/11/2006	C7-C1	7	12.131	15.20	30.50	60,400	2,192	332.86
50	M3 C300 GA	16/11/2006	C7-C2	7	13.790	16.00	31.70	68,500	2,164	340.69
51	M3 C300 GA	16/11/2006	C7-C3	7	12.115	15.20	30.40	61,700	2,196	340.02
52	M3 C300 GA	16/11/2006	C14-C1	14	12.138	15.10	30.40	72,300	2,230	403.73

	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
53	M3 C300 GA	16/11/2006	C14-C2	14	13.849	15.90	31.70	77,900	2,200	392.33
54	M3 C300 GA	16/11/2006	C14-C3	14	12.422	15.50	30.60	72,200	2,151	382.63
55	M3 C300 GA	16/11/2006	C28-C1	28	12.385	15.50	30.40	74,400	2,159	394.29
56	M3 C300 GA	16/11/2006	C28-C2	28	12.098	15.20	30.50	72,800	2,186	401.19
57	M3 C300 GA	16/11/2006	C28-C3	28	12.086	15.20	30.40	73,200	2,191	403.40
58	M3 C300 GA	16/11/2006	C90-C1	91	13.894	15.80	31.80	87,200	2,228	444.75
59	M3 C300 GA	16/11/2006	C90-C2	91	12.121	15.20	30.40	85,200	2,197	469.53
60	M3 C300 GA	16/11/2006	C90-C3	91	12.166	15.20	30.50	84,800	2,198	467.32
61	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C7-C1	7	11.776	15.20	30.50	26,700	2,128	147.14
62	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C7-C2	7	13.449	16.00	31.60	26,500	2,117	131.80
63	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C7-C3	7	11.775	15.20	30.40	26,600	2,135	146.59
64	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C14-C1	14	11.823	15.20	30.50	31,300	2,136	172.49
65	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C14-C2	14	13.452	15.90	31.60	35,800	2,144	180.30
66	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C14-C3	14	13.378	15.90	31.40	35,100	2,146	176.78
67	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C28-C1	28	13.578	16.00	31.70	39,400	2,130	195.96
68	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C28-C2	28	11.300	15.00	29.80	35,500	2,146	200.89
69	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C28-C3	28	11.795	15.20	30.40	34,700	2,138	191.23
70	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C90-C1	91	11.827	15.30	30.40	57,600	2,116	313.29
71	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C90-C2	91	11.770	15.10	30.30	60,000	2,169	335.05
72	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	C90-C3	91	12.090	15.40	30.70	59,400	2,114	318.90
73	M2 C250 GA	25/01/2007	C7-C1	7	12.106	15.30	30.40	60,700	2,166	330.15
74	M2 C250 GA	25/01/2007	C7-C2	7	13.808	16.00	31.60	65,500	2,173	325.77
75	M2 C250 GA	25/01/2007	C7-C3	7	13.933	16.00	31.80	61,700	2,179	306.87
76	M2 C250 GA	25/01/2007	C14-C1	14	12.321	15.60	30.40	70,400	2,120	368.33
77	M2 C250 GA	25/01/2007	C14-C2	14	12.084	15.30	30.40	71,600	2,162	389.44
78	M2 C250 GA	25/01/2007	C14-C3	14	13.830	15.90	31.60	75,500	2,204	380.24
79	M2 C250 GA	25/01/2007	C28-C1	28	12.113	15.20	30.40	76,400	2,196	421.03
80	M2 C250 GA	25/01/2007	C28-C2	28	12.168	15.20	30.40	79,100	2,206	435.91
81	M2 C250 GA	25/01/2007	C28-C3	28	12.033	15.20	30.40	73,800	2,181	406.70
82	M2 C250 GA	25/01/2007	C90-C1	91	12.161	15.20	30.40	77,000	2,205	424.34
83	M2 C250 GA	25/01/2007	C90-C2	91	13.956	15.80	31.70	91,400	2,245	466.17
84	M2 C250 GA	25/01/2007	C90-C3	91	12.109	15.10	30.40	86,400	2,224	482.47
85	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C7-C1	7	11.851	15.40	30.40	20,500	2,093	110.06
86	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C7-C2	7	11.858	15.20	30.50	22,000	2,143	121.24
87	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C7-C3	7	13.496	16.00	31.70	22,200	2,117	110.41
88	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C14-C1	14	11.828	15.10	30.50	27,100	2,166	151.33
89	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C14-C2	14	11.865	15.20	30.40	28,700	2,151	158.16
90	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C14-C3	14	13.490	16.00	31.60	29,100	2,123	144.73
91	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C28-C1	28	11.944	15.10	30.40	30,800	2,194	171.99
92	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C28-C2	28	11.893	15.20	30.40	32,200	2,156	177.45
93	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C28-C3	28	11.880	15.10	30.40	30,800	2,182	171.99
94	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C90-C1	90	13.735	15.90	31.80	51,100	2,175	257.36
95	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C90-C2	90	11.968	15.20	30.50	51,200	2,162	282.16
96	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	C90-C3	90	11.887	15.20	30.40	48,500	2,155	267.28
97	M1 C200 GA	01/02/2007	C7-C1	7	12.355	15.60	30.50	39,300	2,119	205.61
98	M1 C200 GA	01/02/2007	C7-C2	7	13.760	16.10	31.30	42,600	2,159	209.25
99	M1 C200 GA	01/02/2007	C7-C3	7	12.085	15.30	30.40	41,700	2,162	226.81
100	M1 C200 GA	01/02/2007	C14-C1	14	11.603	15.00	29.90	46,300	2,196	262.00
101	M1 C200 GA	01/02/2007	C14-C2	14	13.750	16.00	31.80	51,400	2,151	255.64
102	M1 C200 GA	01/02/2007	C14-C3	14	11.999	15.20	30.50	50,500	2,168	278.30
103	M1 C200 GA	01/02/2007	C28-C1	28	12.113	15.20	30.60	49,500	2,181	272.79
104	M1 C200 GA	01/02/2007	C28-C2	28	12.195	15.60	30.40	50,300	2,099	263.16
105	M1 C200 GA	01/02/2007	C28-C3	28	12.048	15.20	30.40	53,000	2,184	292.08
106	M1 C200 GA	01/02/2007	C90-C1	91	11.826	15.10	29.90	53,200	2,209	297.08

	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
107	M1 C200 GA	01/02/2007	C90-C2	91	12.042	15.20	30.30	43,900	2,190	241.93
108	M1 C200 GA	01/02/2007	C90-C3	91	12.095	15.20	30.40	55,500	2,193	305.85
109	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C7-C1	7	11.828	15.20	30.60	10,100	2,130	55.66
110	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C7-C2	7	13.371	16.00	31.60	10,000	2,104	49.74
111	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C7-C3	7	11.818	15.20	30.50	10,100	2,135	55.66
112	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C14-C1	14	11.875	15.20	30.50	13,200	2,146	72.74
113	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C14-C2	14	11.995	15.20	30.10	12,900	2,196	71.09
114	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C14-C3	14	13.462	16.00	30.60	14,200	2,188	70.62
115	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C28-C1	28	11.762	15.20	30.40	15,900	2,132	87.62
116	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C28-C2	28	11.855	15.30	30.50	16,700	2,114	90.83
117	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C28-C3	28	11.810	15.20	30.40	16,300	2,141	89.83
118	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C90-C1	91	11.879	15.20	30.20	28,900	2,168	159.26
119	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C90-C2	91	13.535	16.10	31.60	31,800	2,104	156.20
120	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	C90-C3	91	11.828	15.20	30.20	28,700	2,158	158.16
121	M6 C400 GC	21/02/2007	C7-C1	7	14.520	15.90	31.60	87,200	2,314	439.17
122	M6 C400 GC	21/02/2007	C7-C2	7	14.478	16.00	31.70	60,300	2,272	299.91
123	M6 C400 GC	21/02/2007	C7-C3	7	14.485	15.90	31.60	88,300	2,309	444.71
124	M6 C400 GC	21/02/2007	C14-C1	14	12.950	15.40	30.30	84,800	2,295	455.26
125	M6 C400 GC	21/02/2007	C14-C2	14	14.445	15.90	31.50	99,500	2,310	501.12
126	M6 C400 GC	21/02/2007	C14-C3	14	12.990	15.40	30.40	94,500	2,294	507.34
127	M6 C400 GC	21/02/2007	C28-C1	28	12.800	15.20	30.50	97,100	2,313	535.11
128	M6 C400 GC	21/02/2007	C28-C2	28	12.676	15.30	30.30	96,700	2,275	525.96
129	M6 C400 GC	21/02/2007	C28-C3	28	12.816	15.30	30.50	98,500	2,285	535.75
130	M6 C400 GC	21/02/2007	C90-C1	91	12.686	15.10	30.40	100,900	2,330	563.44
131	M6 C400 GC	21/02/2007	C90-C2	91	13.030	15.30	30.60	108,300	2,316	589.05
132	M6 C400 GC	21/02/2007	C90-C3	91	12.758	15.10	30.30	102,900	2,351	574.61
133	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C7-C1	7	12.210	15.20	30.50	40,600	2,206	223.74
134	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C7-C2	7	12.190	15.20	30.50	41,600	2,203	229.25
135	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C7-C3	7	13.891	15.90	31.70	44,500	2,207	224.12
136	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C14-C1	14	12.550	15.40	30.60	51,100	2,202	274.34
137	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C14-C2	14	12.230	15.10	30.40	51,400	2,247	287.02
138	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C14-C3	14	13.922	15.90	31.60	54,600	2,219	274.98
139	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C28-C1	28	12.220	15.20	30.40	59,200	2,215	326.24
140	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C28-C2	28	12.178	15.20	30.50	58,500	2,200	322.39
141	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C28-C3	28	12.160	15.20	30.40	59,700	2,204	329.00
142	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C90-C1	90	12.175	15.30	30.50	73,800	2,171	401.40
143	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C90-C2	90	12.193	15.20	30.30	79,000	2,218	435.36
144	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	C90-C3	90	13.965	16.10	31.80	75,700	2,157	371.84
145	M7 C450 GC	13/03/2007	C7-C1	7	12.788	15.20	30.50	92,300	2,311	508.66
146	M7 C450 GC	13/03/2007	C7-C2	7	12.942	15.60	30.40	79,900	2,227	418.03
147	M7 C450 GC	13/03/2007	C7-C3	7	13.032	15.50	30.70	92,900	2,250	492.34
148	M7 C450 GC	13/03/2007	C14-C1	14	12.825	15.20	30.50	98,700	2,317	543.93
149	M7 C450 GC	13/03/2007	C14-C2	14	12.680	15.20	30.40	100,400	2,299	553.29
150	M7 C450 GC	13/03/2007	C14-C3	14	12.678	15.20	30.50	100,100	2,291	551.64
151	M7 C450 GC	13/03/2007	C28-C1	28	14.687	16.00	31.70	118,300	2,304	588.37
152	M7 C450 GC	13/03/2007	C28-C2	28	12.686	15.20	30.40	91,200	2,300	502.59
153	M7 C450 GC	13/03/2007	C28-C3	28	12.751	15.20	30.40	97,500	2,311	537.31
154	M7 C450 GC	13/03/2007	C90-C1	91	14.586	15.90	31.60	129,700	2,325	653.21
155	M7 C450 GC	13/03/2007	C90-C2	91	12.779	15.20	30.50	105,900	2,309	583.60
156	M7 C450 GC	13/03/2007	C90-C3	91	14.589	15.90	31.60	129,800	2,325	653.72
157	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C7-C1	7	12.529	15.30	30.30	49,200	2,249	267.60
158	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C7-C2	7	13.913	15.90	31.70	54,900	2,210	276.49
159	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C7-C3	7	12.185	15.20	30.50	48,100	2,202	265.07
160	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C14-C1	14	13.924	15.80	31.70	63,600	2,240	324.38



	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
161	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C14-C2	14	12.156	15.20	30.40	55,400	2,204	305.30
162	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C14-C3	14	12.186	15.10	30.40	56,800	2,238	317.18
163	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C28-C1	28	12.477	15.40	30.40	70,100	2,203	376.34
164	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C28-C2	28	12.119	15.20	30.40	65,500	2,197	360.96
165	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C28-C3	28	13.885	16.00	31.60	67,100	2,185	333.73
166	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C90-C1	91	13.976	15.80	31.70	93,200	2,249	475.35
167	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C90-C2	91	12.262	15.20	30.50	87,200	2,216	480.55
168	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	C90-C3	91	12.207	15.20	30.50	84,500	2,206	465.67

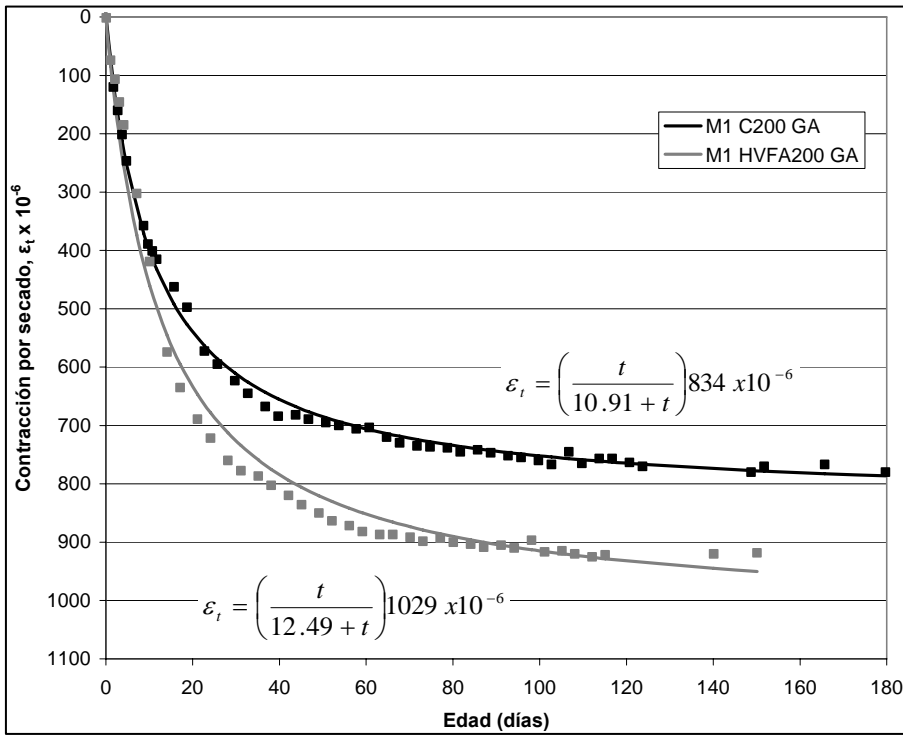
#### A6. Datos de pruebas del ensayo a tensión indirecta por compresión diametral.

	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	M4300GC	31/10/2006	T28-C1	28	12.983	15.40	30.50	20,450	2,285	27.72
2	M4300GC	31/10/2006	T28-C2	28	12.632	15.10	30.50	23,880	2,313	33.01
3	M4300GC	31/10/2006	T28-C3	28	14.478	15.40	31.60	24,100	2,460	31.53
4	M4300GC	31/10/2006	T90-C1	90	12.747	15.40	30.40	15,940	2,251	21.68
5	M4300GC	31/10/2006	T90-C2	90	12.604	15.10	30.30	24,850	2,323	34.58
6	M4300GC	31/10/2006	T90-C3	90	14.427	16.00	31.50	26,460	2,278	33.42
7	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T28-C1	28	12.564	15.40	30.40	14,300	2,219	19.45
8	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T28-C2	28	11.862	15.00	29.90	14,990	2,245	21.28
9	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T28-C3	28	12.748	15.30	30.20	13,900	2,296	19.15
10	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T90-C1	91	11.997	15.20	29.80	17,480	2,219	24.57
11	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T90-C2	91	12.368	15.20	30.40	19,800	2,242	27.28
12	M4 HVFA300 GC	07/11/2006	T90-C3	91	14.061	15.90	31.50	25,190	2,248	32.02
13	M5 C350 GC	09/11/2006	T28-C1	28	12.638	15.20	30.40	23,300	2,291	32.10
14	M5 C350 GC	09/11/2006	T28-C2	28	12.608	15.10	30.30	25,630	2,324	35.66
15	M5 C350 GC	09/11/2006	T28-C3	28	12.783	15.60	30.20	23,930	2,215	32.34
16	M5 C350 GC	09/11/2006	T90-C1	91	12.879	15.30	30.40	31,710	2,304	43.40
17	M5 C350 GC	09/11/2006	T90-C2	91	12.679	15.10	30.40	28,340	2,329	39.30
18	M5 C350 GC	09/11/2006	T90-C3	91	12.936	15.50	30.20	30,560	2,270	41.56
19	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T28-C1	29	12.290	15.20	30.40	14,390	2,228	19.83
20	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T28-C2	29	12.387	15.30	30.40	17,510	2,216	23.97
21	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T28-C3	29	11.670	15.10	30.00	17,840	2,172	25.07
22	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T90-C1	91	12.283	15.00	30.30	21,160	2,294	29.64
23	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T90-C2	91	12.360	15.20	30.40	25,320	2,241	34.88
24	M5 HVFA350 GC	14/11/2006	T90-C3	91	12.615	15.50	30.30	22,800	2,206	30.91
25	M3 C300 GA	16/11/2006	T28-C1	28	12.092	15.30	30.30	22,070	2,171	30.31
26	M3 C300 GA	16/11/2006	T28-C2	28	11.635	15.10	29.70	17,080	2,188	24.25
27	M3 C300 GA	16/11/2006	T28-C3	28	11.727	15.00	30.00	16,220	2,212	22.95
28	M3 C300 GA	16/11/2006	T90-C1	91	12.176	15.20	30.40	21,210	2,207	29.22
29	M3 C300 GA	16/11/2006	T90-C2	91	11.615	15.00	30.00	24,970	2,191	35.33
30	M3 C300 GA	16/11/2006	T90-C3	91	12.140	15.20	30.60	22,630	2,186	30.97
31	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T28-C1	28	11.868	15.20	30.40	12,500	2,151	17.22
32	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T28-C2	28	11.761	15.20	30.40	11,730	2,132	16.16
33	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T28-C3	28	12.060	15.40	30.20	14,440	2,144	19.77
34	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T90-C1	91	12.048	15.40	30.30	17,740	2,135	24.20
35	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T90-C2	91	11.282	15.00	29.70	18,990	2,150	27.14
36	M3 HVFA300 GA	23/01/2007	T90-C3	91	11.737	15.20	30.30	17,350	2,135	23.98
37	M2 C250 GA	25/01/2007	T28-C1	28	12.002	15.20	30.50	25,050	2,169	34.40
38	M2 C250 GA	25/01/2007	T28-C2	28	12.165	15.20	30.80	21,620	2,177	29.40
39	M2 C250 GA	25/01/2007	T28-C3	28	11.622	15.10	29.90	20,360	2,171	28.71

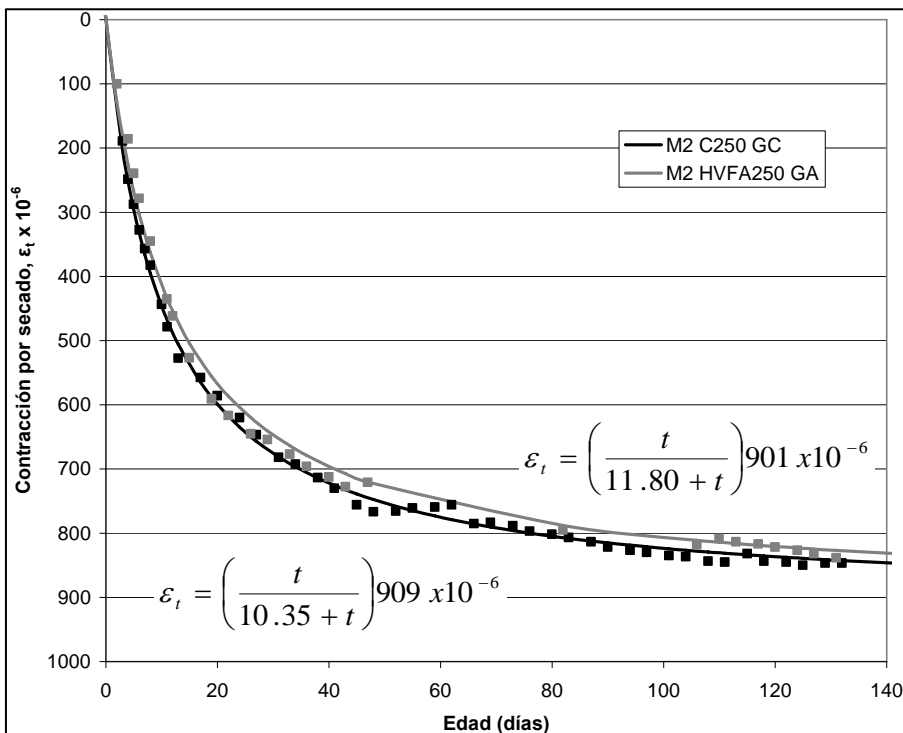
	Mezcla	Fecha de colado	Códigos	Edad	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	P.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
40	M2 C250 GA	25/01/2007	T90-C1	91	12.460	15.40	30.50	22,450	2,193	30.43
41	M2 C250 GA	25/01/2007	T90-C2	91	12.335	15.20	30.50	21,270	2,229	29.21
42	M2 C250 GA	25/01/2007	T90-C3	91	11.822	15.00	30.00	23,250	2,230	32.89
43	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T28-C1	28	13.520	16.00	31.50	11,140	2,135	14.07
44	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T28-C2	28	11.845	15.00	30.40	10,770	2,205	15.04
45	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T28-C3	28	11.892	15.20	30.40	10,580	2,156	14.58
46	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T90-C1	90	12.208	15.50	30.40	15,450	2,128	20.87
47	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T90-C2	90	11.986	15.20	30.20	18,550	2,187	25.73
48	M2 HVFA250 GA	30/01/2007	T90-C3	90	12.168	15.40	30.30	14,300	2,156	19.51
49	M1 C200 GA	01/02/2007	T28-C1	28	12.094	15.20	30.70	16,360	2,171	22.32
50	M1 C200 GA	01/02/2007	T28-C2	28	12.006	15.30	30.40	13,500	2,148	18.48
51	M1 C200 GA	01/02/2007	T28-C3	28	13.725	16.00	31.60	16,560	2,160	20.85
52	M1 C200 GA	01/02/2007	T90-C1	91	12.186	15.20	30.50	18,310	2,202	25.14
53	M1 C200 GA	01/02/2007	T90-C2	91	12.064	15.20	30.50	18,110	2,180	24.87
54	M1 C200 GA	01/02/2007	T90-C3	91	12.023	15.10	30.50	17,980	2,201	24.85
55	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T28-C1	28	12.154	15.50	30.50	6,840	2,112	9.21
56	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T28-C2	28	11.414	15.10	29.90	6,450	2,132	9.09
57	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T28-C3	28	11.862	15.20	30.30	7,260	2,157	10.04
58	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T90-C1	91	13.579	16.00	31.80	12,230	2,124	15.30
59	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T90-C2	91	11.270	14.90	29.80	10,580	2,169	15.17
60	M1 HVFA200 GA	07/02/2007	T90-C3	91	11.880	15.20	30.30	12,890	2,161	17.82
61	M6 C400 GC	21/02/2007	T28-C1	28	12.646	15.30	29.90	23,830	2,300	33.16
62	M6 C400 GC	21/02/2007	T28-C2	28	12.662	15.20	30.30	31,000	2,303	42.85
63	M6 C400 GC	21/02/2007	T28-C3	28	12.732	15.20	30.50	30,110	2,300	41.35
64	M6 C400 GC	21/02/2007	T90-C1	91	12.276	15.00	30.00	29,930	2,316	42.34
65	M6 C400 GC	21/02/2007	T90-C2	91	12.757	15.20	30.40	33,050	2,313	45.53
66	M6 C400 GC	21/02/2007	T90-C3	91	12.735	15.20	30.40	35,260	2,309	48.58
67	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T28-C1	28	11.853	15.00	30.00	15,360	2,236	21.73
68	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T28-C2	28	12.536	15.40	30.50	21,050	2,207	28.53
69	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T28-C3	28	12.150	15.20	30.50	20,270	2,195	27.83
70	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T90-C1	90	12.136	15.30	30.40	22,410	2,171	30.67
71	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T90-C2	90	12.622	15.30	30.80	19,460	2,229	26.29
72	M6 HVFA400 GC	28/02/2007	T90-C3	90	12.319	15.60	30.30	19,840	2,127	26.72
73	M7 C450 GC	13/03/2007	T28-C1	28	14.669	16.00	31.60	32,100	2,309	40.42
74	M7 C450 GC	13/03/2007	T28-C2	28	12.716	15.30	30.40	37,000	2,275	50.64
75	M7 C450 GC	13/03/2007	T28-C3	28	12.710	15.10	30.50	31,300	2,327	43.27
76	M7 C450 GC	13/03/2007	T90-C1	91	12.821	15.10	30.50	31,570	2,347	43.64
77	M7 C450 GC	13/03/2007	T90-C2	91	12.259	15.00	29.80	20,430	2,328	29.10
78	M7 C450 GC	13/03/2007	T90-C3	91	13.175	15.30	30.80	31,740	2,327	42.88
79	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T28-C1	28	12.160	15.30	30.40	16,570	2,176	22.68
80	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T28-C2	28	12.122	15.20	30.50	22,600	2,190	31.03
81	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T28-C3	28	12.217	15.10	30.50	19,520	2,237	26.98
82	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T90-C1	91	12.227	15.10	30.40	22,570	2,246	31.30
83	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T90-C2	91	12.141	15.10	30.40	20,040	2,230	27.79
84	M7 HVFA450 GC	15/03/2007	T90-C3	91	12.168	15.10	30.50	21,920	2,228	30.30

A7. Curvas de contracción por secado.

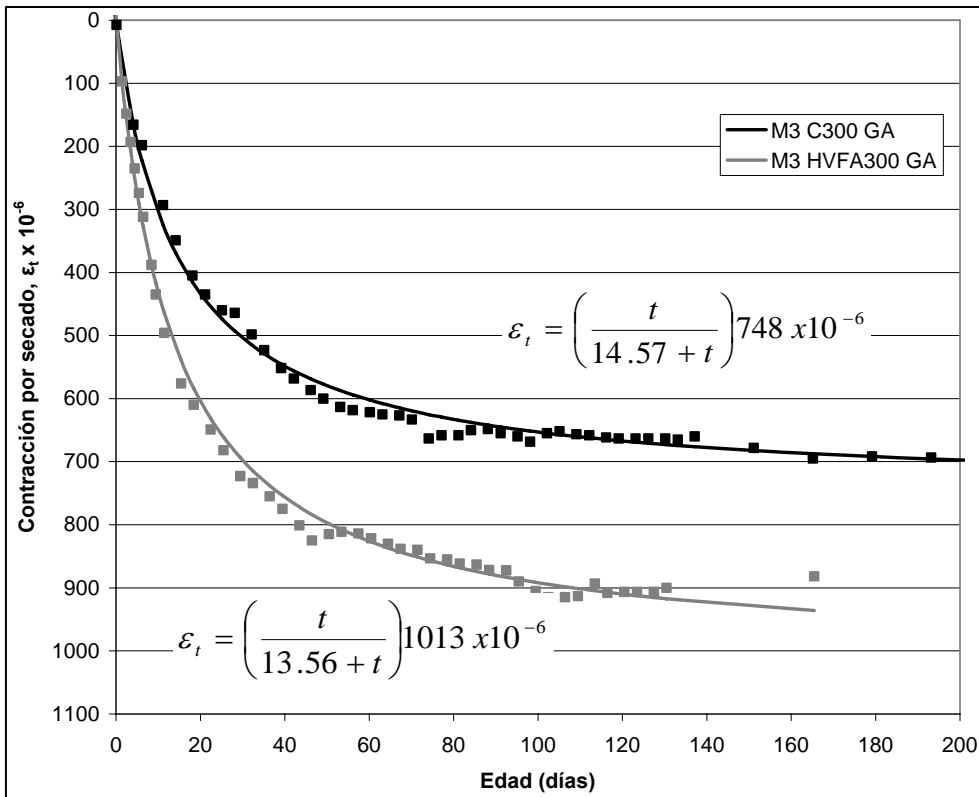
A7-1 Curvas de contracción por secado en las mezclas M1.



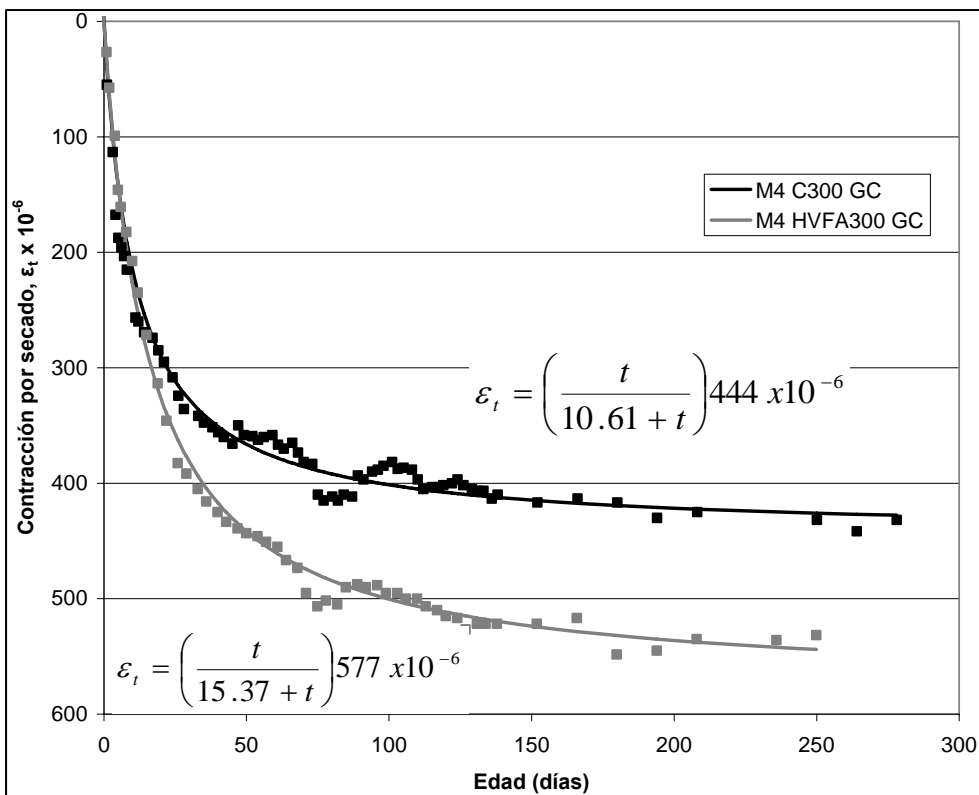
A7-2 Curvas de contracción por secado en las mezclas M2.



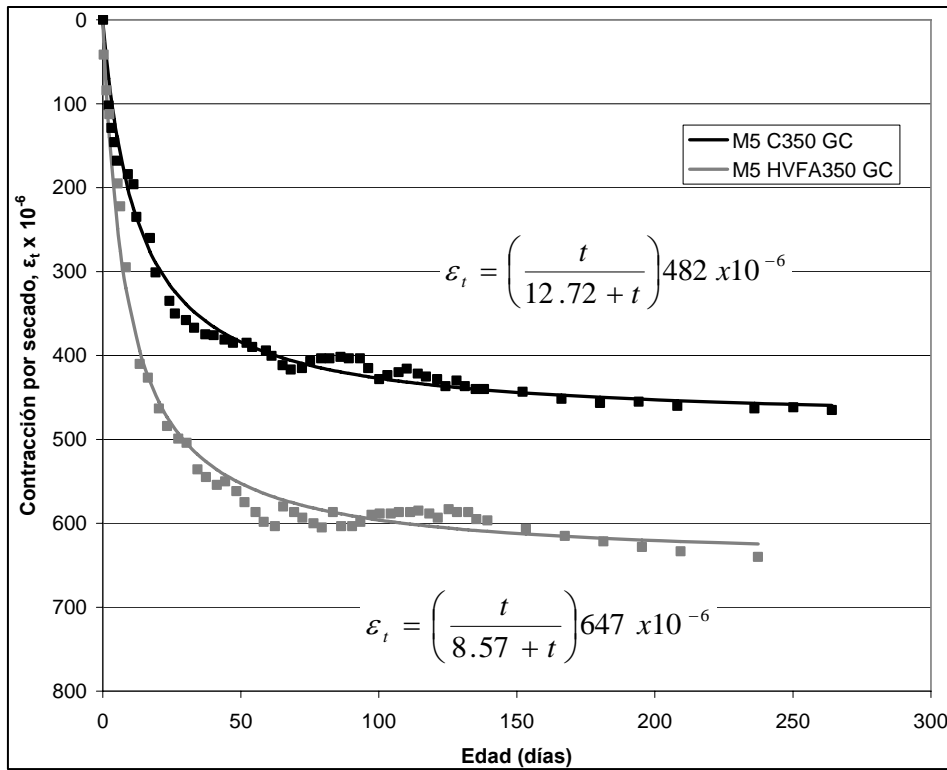
A7-3 Curvas de contracción por secado en las mezclas M3.



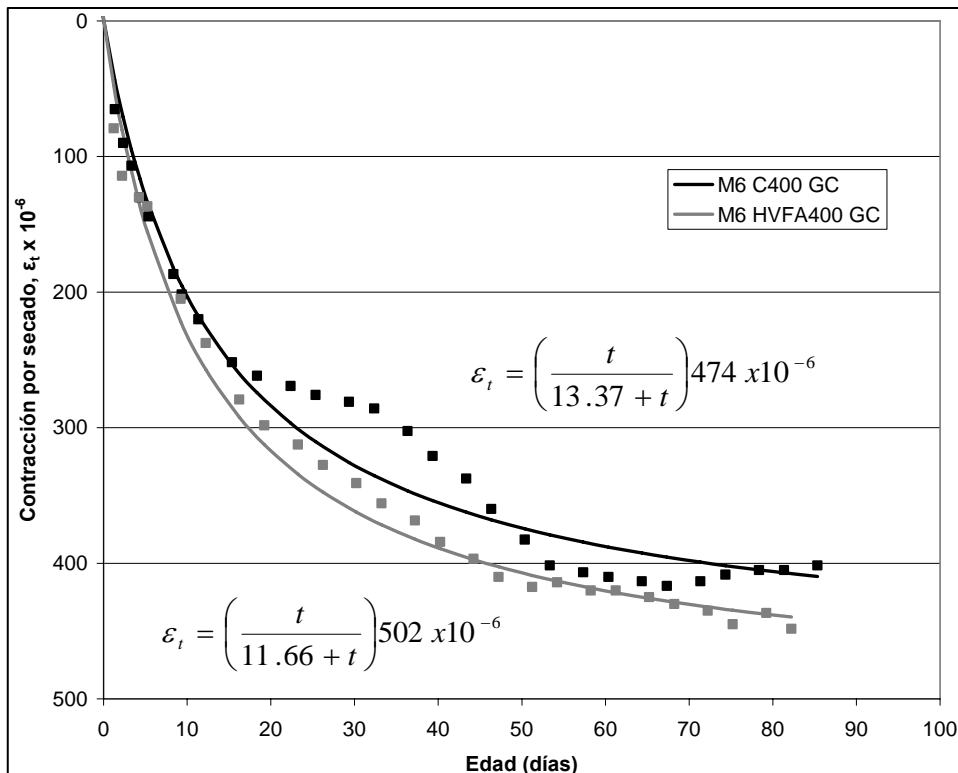
A7-4 Curvas de contracción por secado en las mezclas M4.



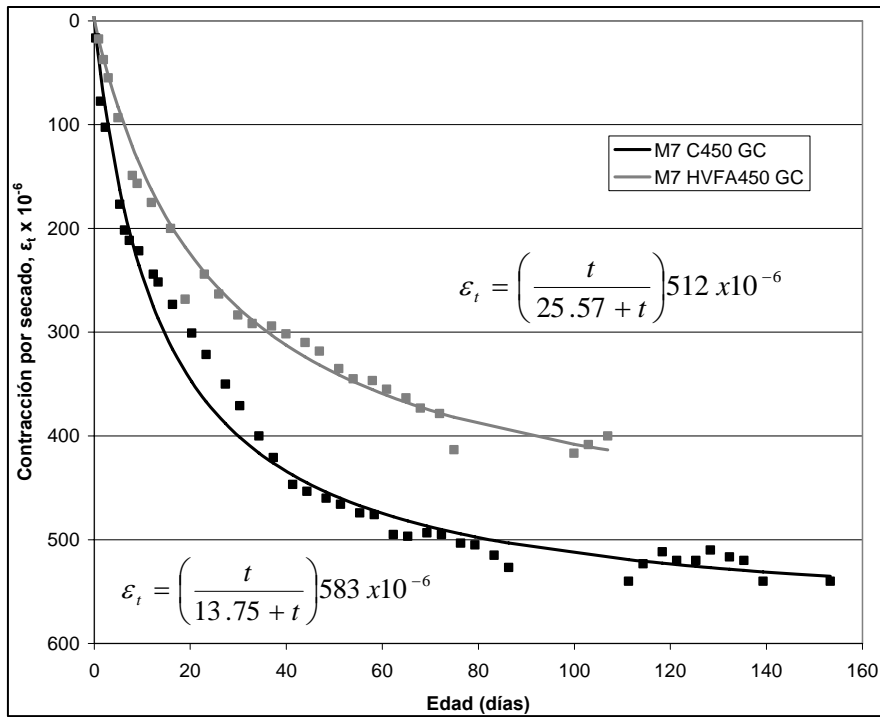
A7-5 Curvas de contracción por secado en las mezclas M5.



A7-6 Curvas de contracción por secado en las mezclas M6.

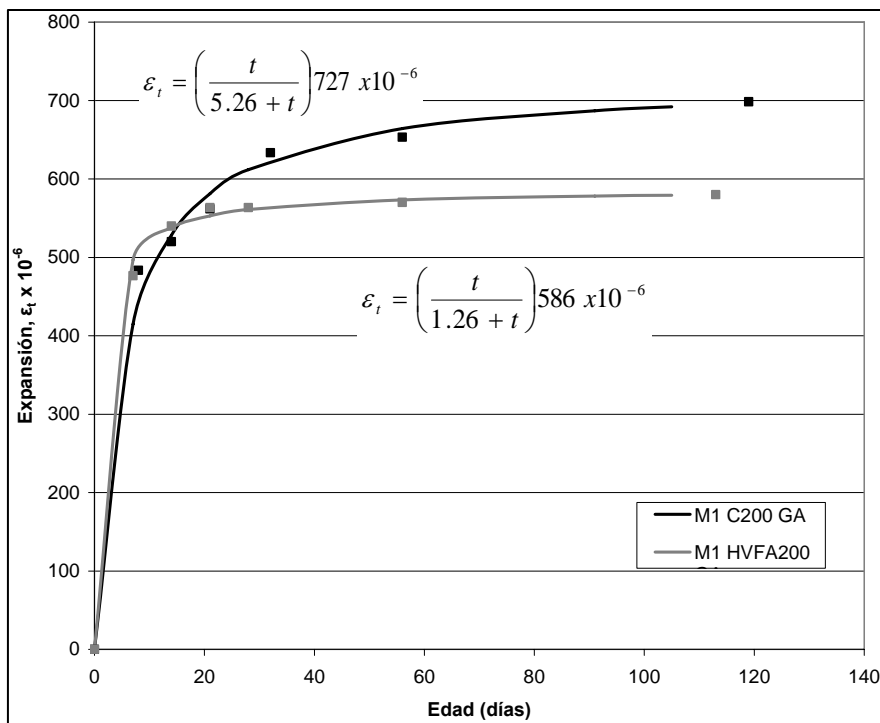


A7-7 Curvas de contracción por secado en las mezclas M7.

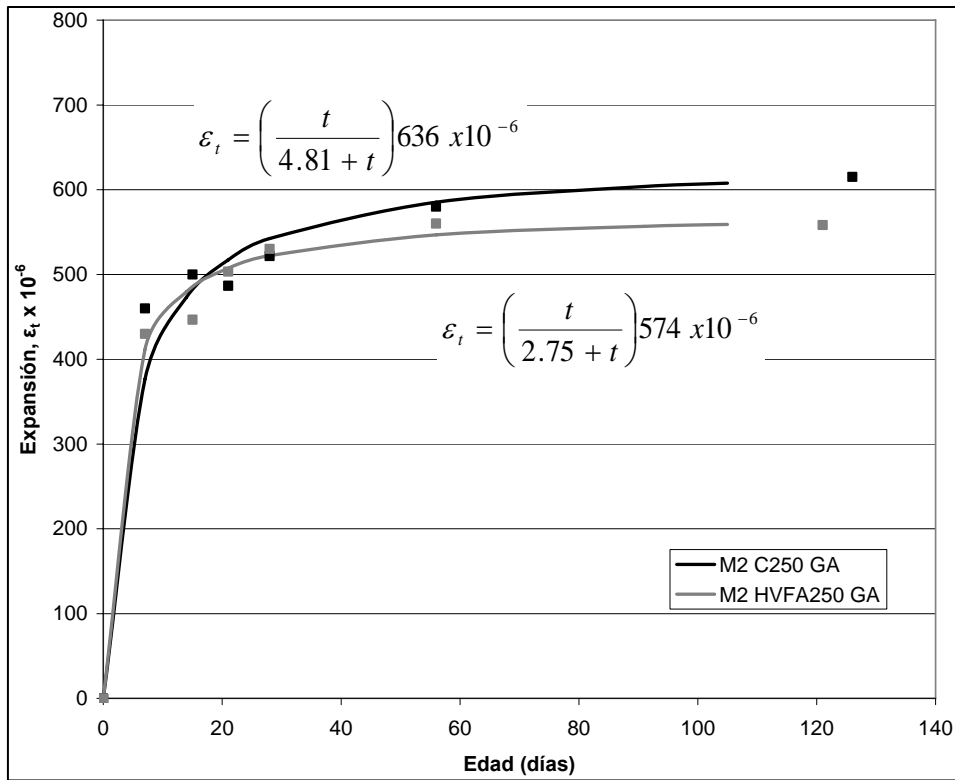


A8. Curvas de expansiones por ataque de sulfatos.

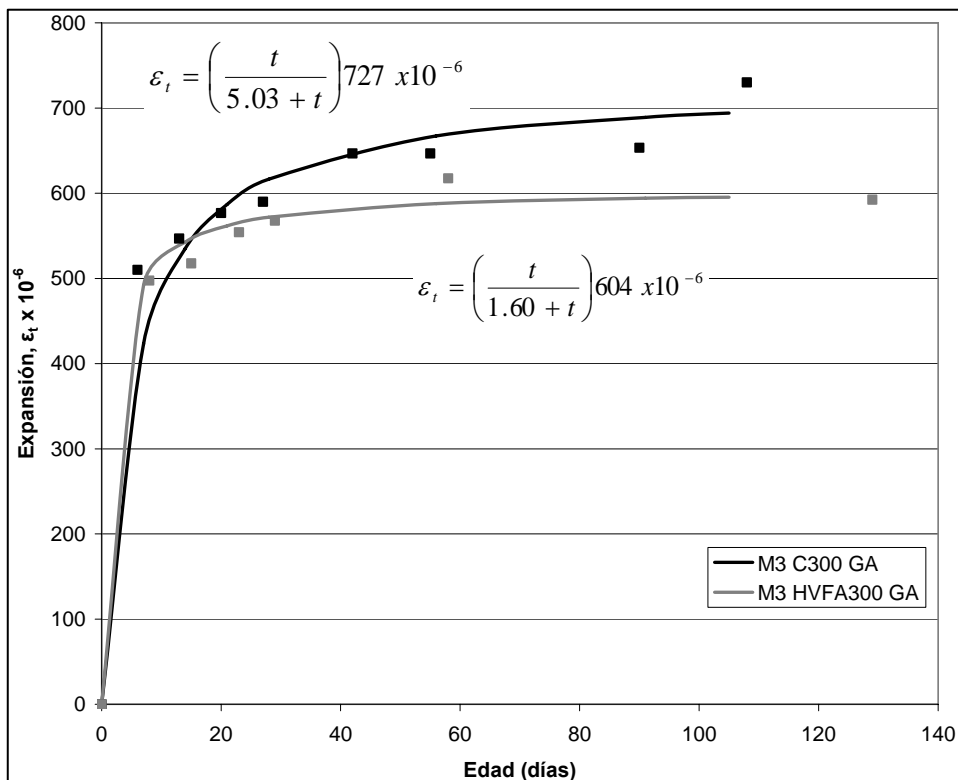
A8-1 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M1.



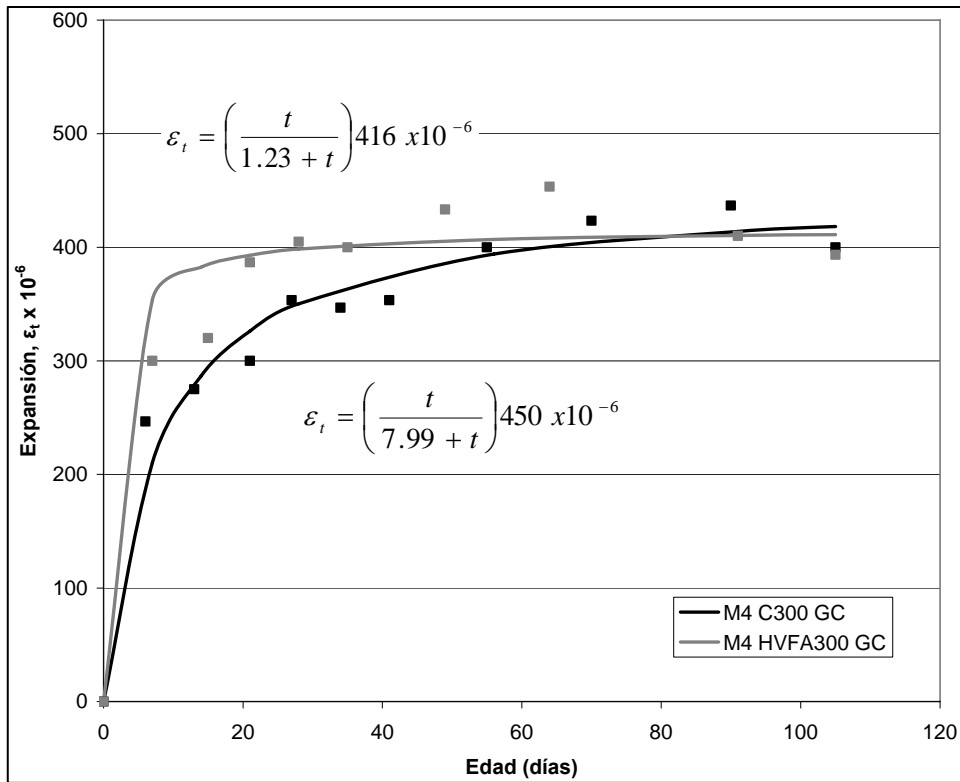
A8-2 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M2.



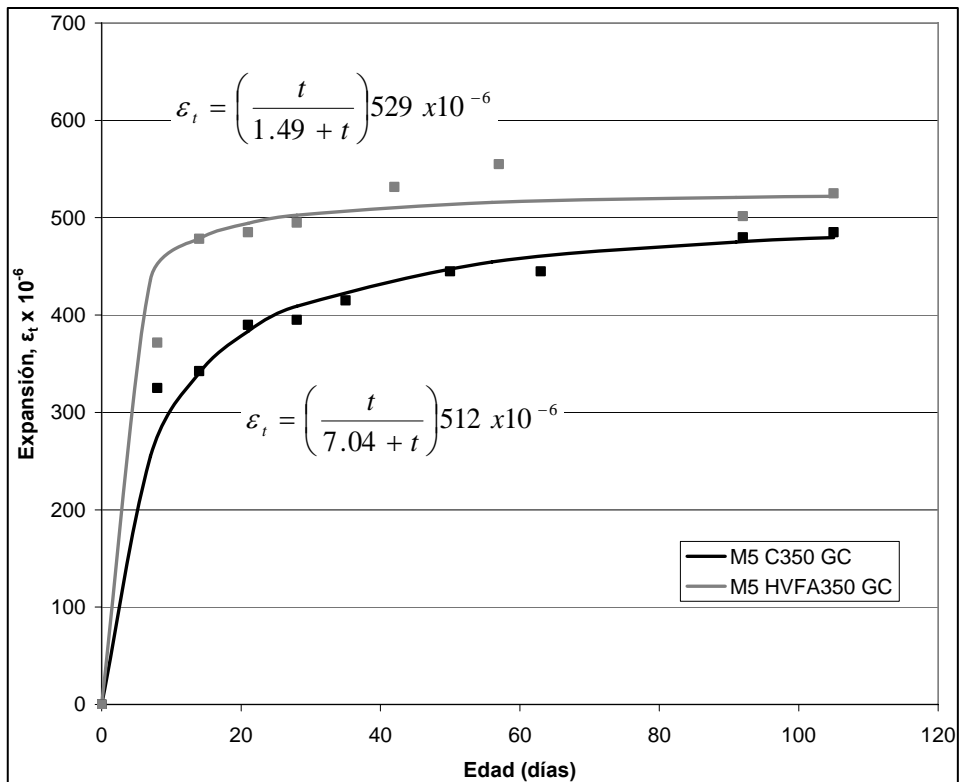
A8-3 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M3.



A8-4 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M4.

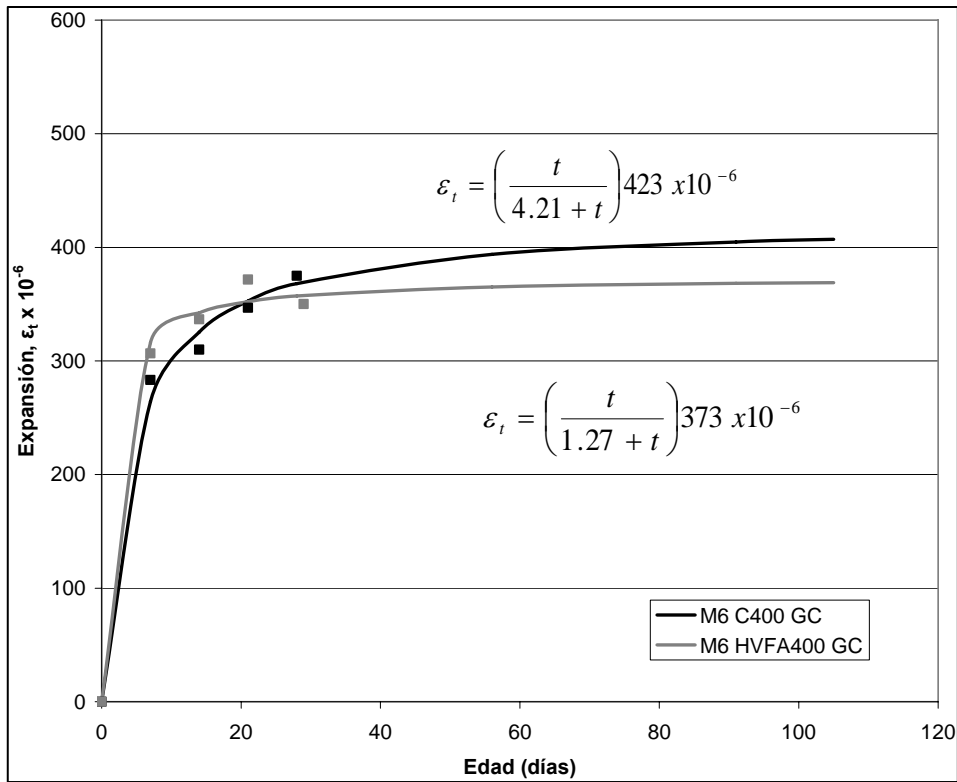


A8-5 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M5.

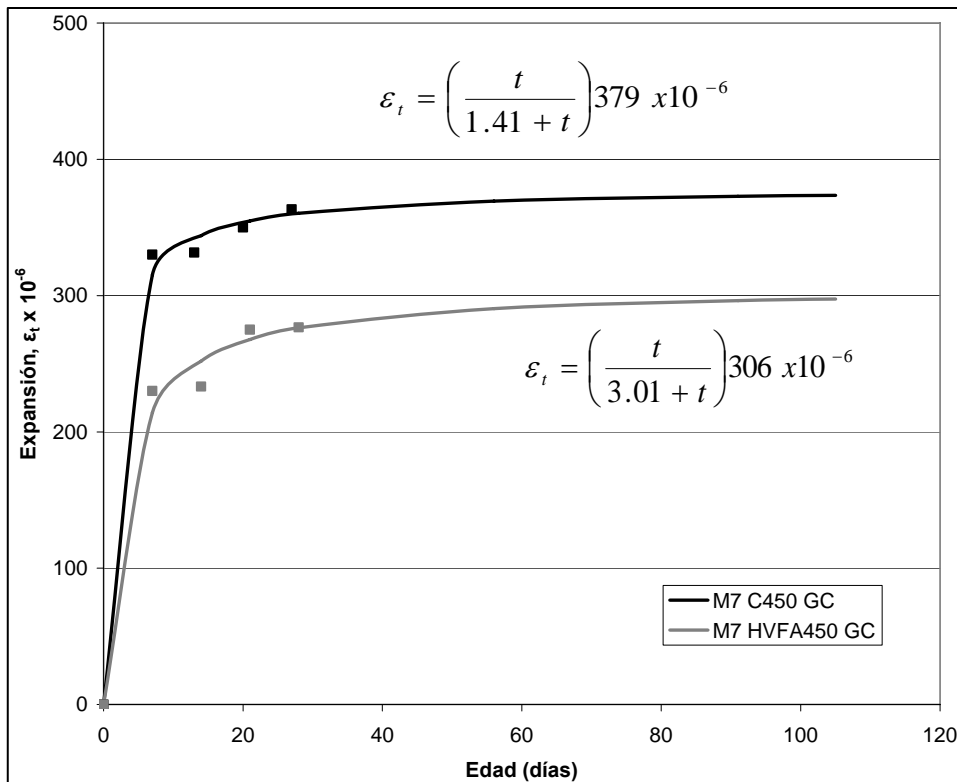




A8-6 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M6.

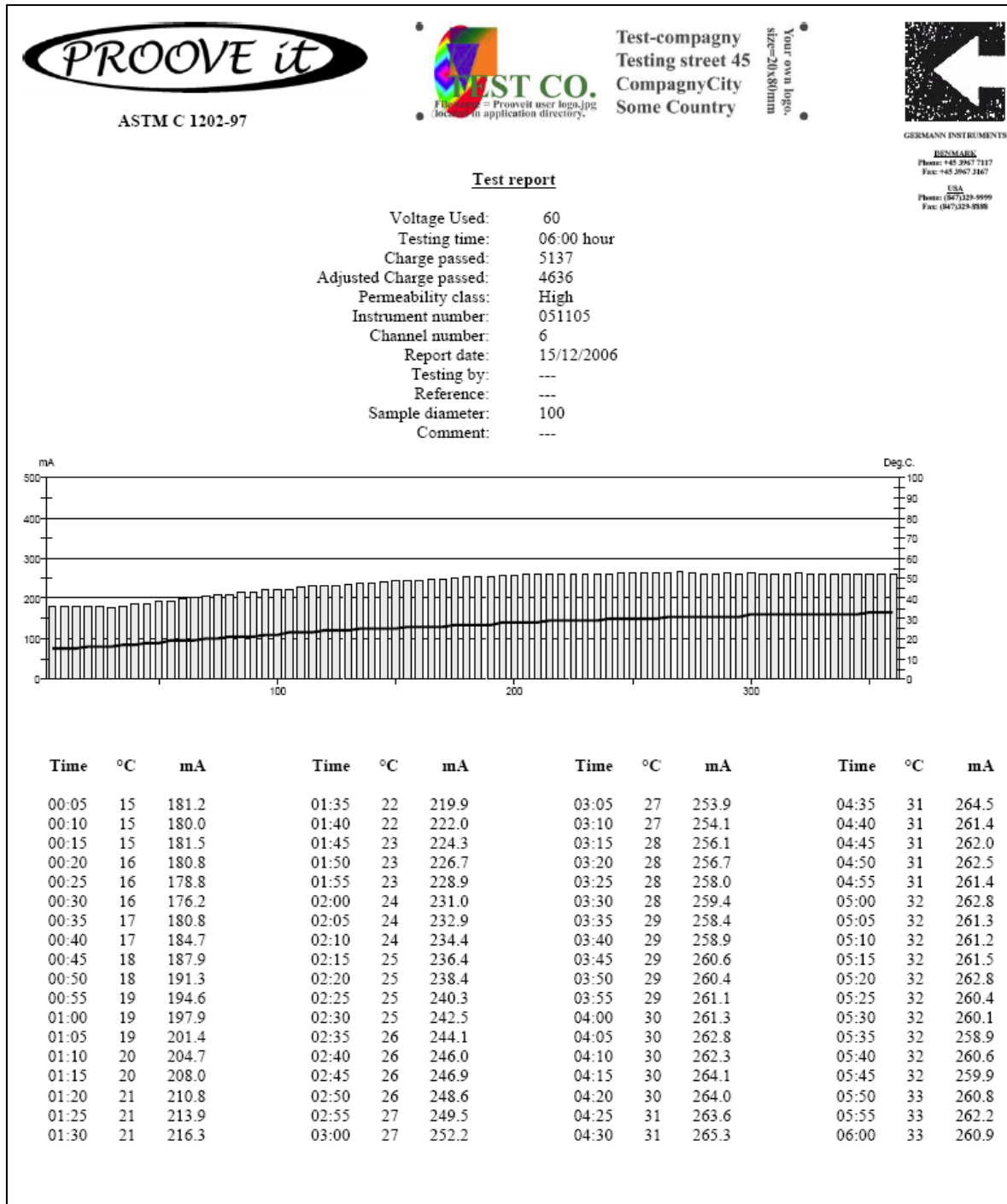


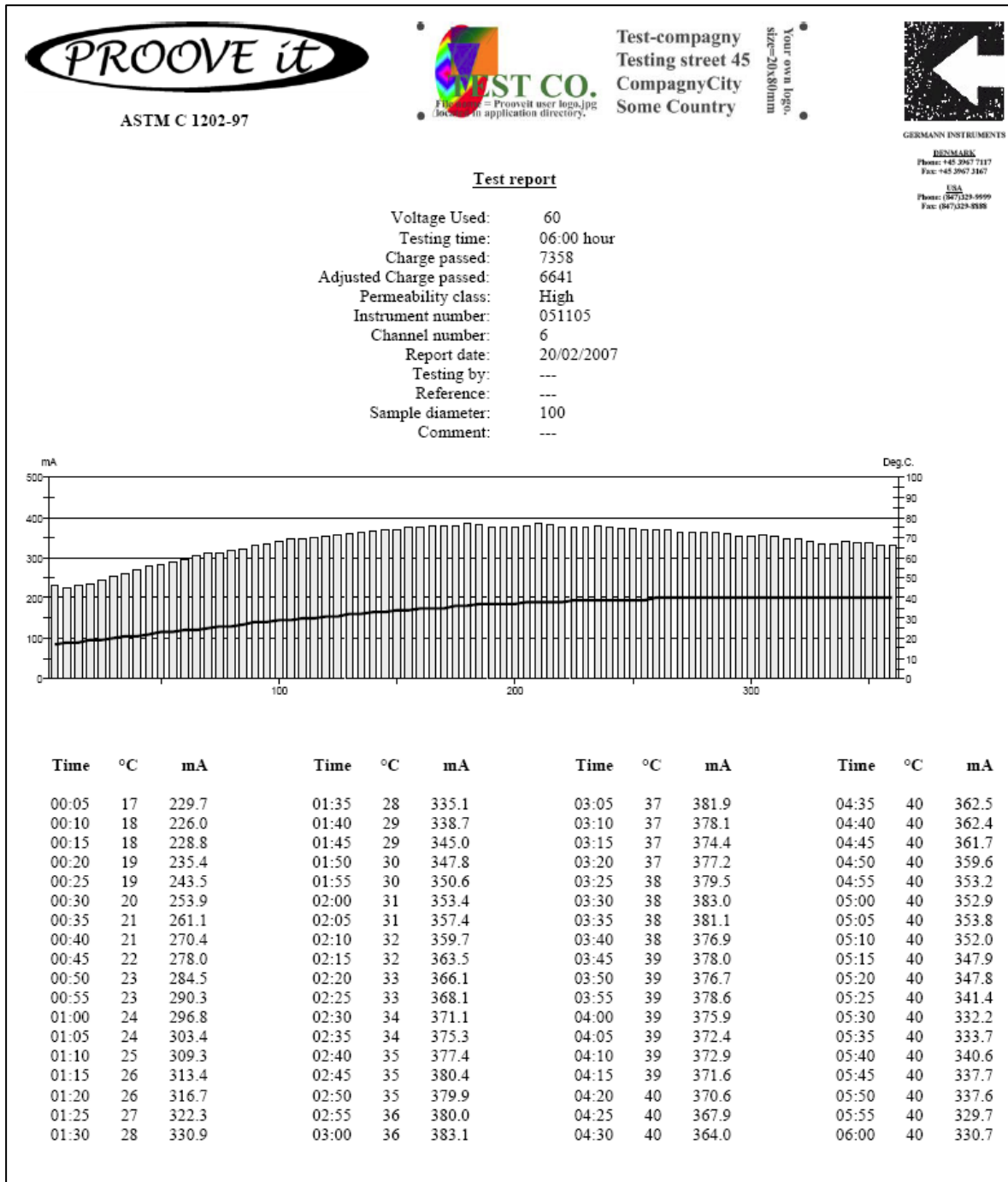
A8-7 Curvas de expansiones por ataque de sulfatos en las mezclas M7.

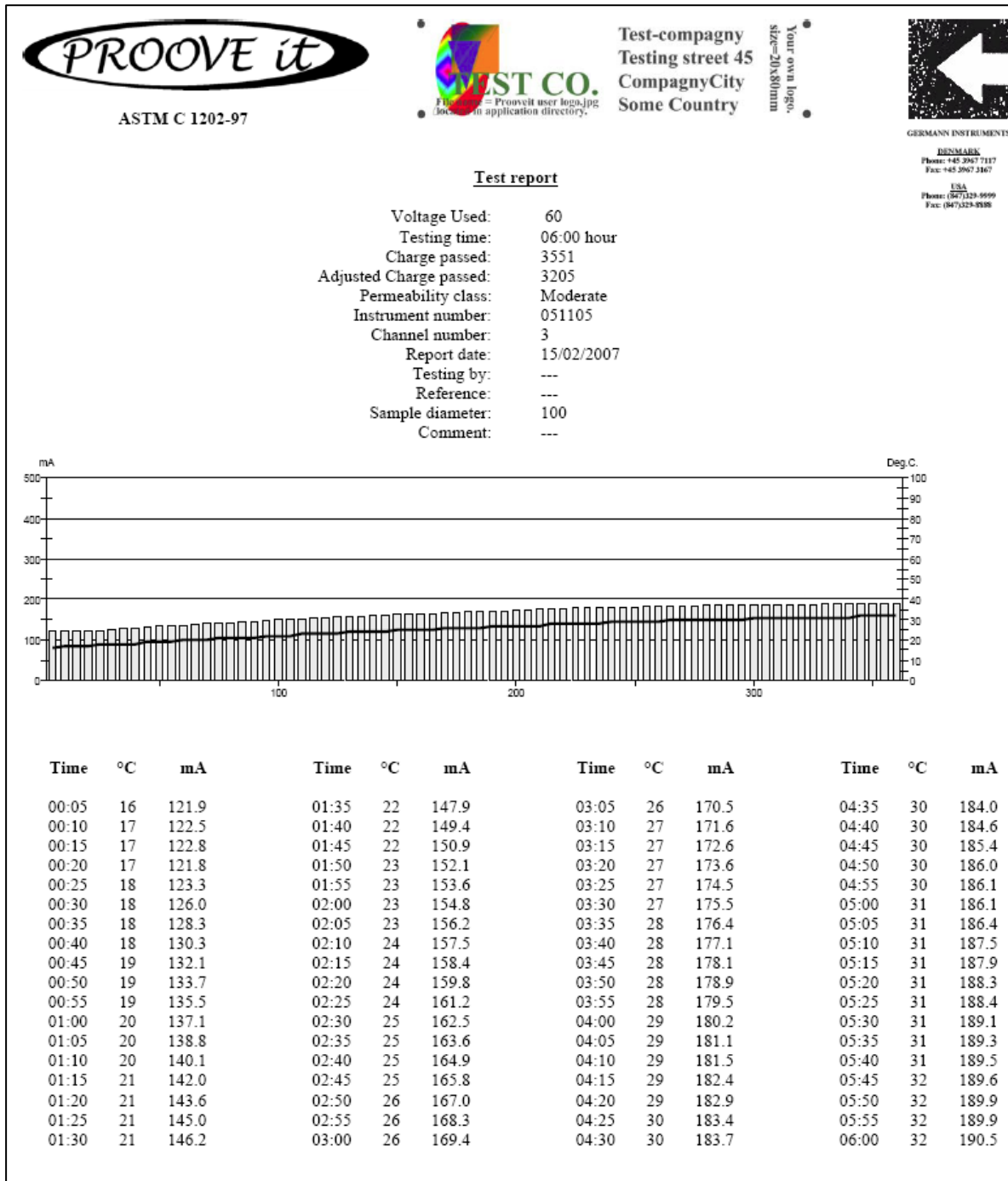


A9. Ejemplos de hojas de resultados de ensayos de permeabilidad.

A9-1 Hoja de resultados de ensayo de permeabilidad canal 6, M3 C300 GA a 28 días.









ASTM C 1202-97



Test-compagny  
Testing street 45  
CompagnyCity  
Some Country

Your own logo,  
size=20x80mm



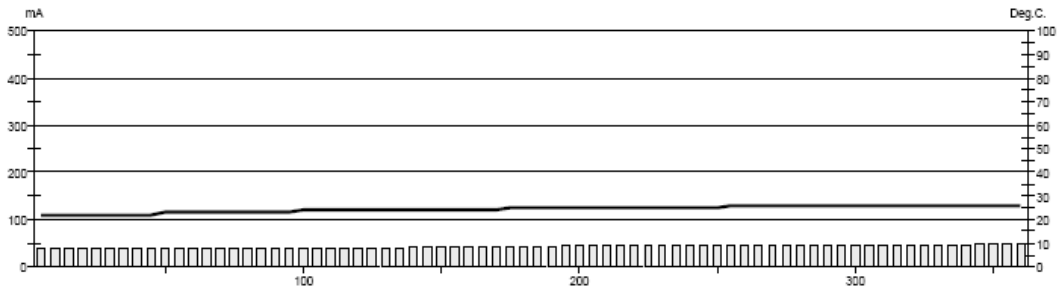
GERMANN INSTRUMENTS

DENMARK  
Phone: +45 3967 7117  
Fax: +45 3967 3167

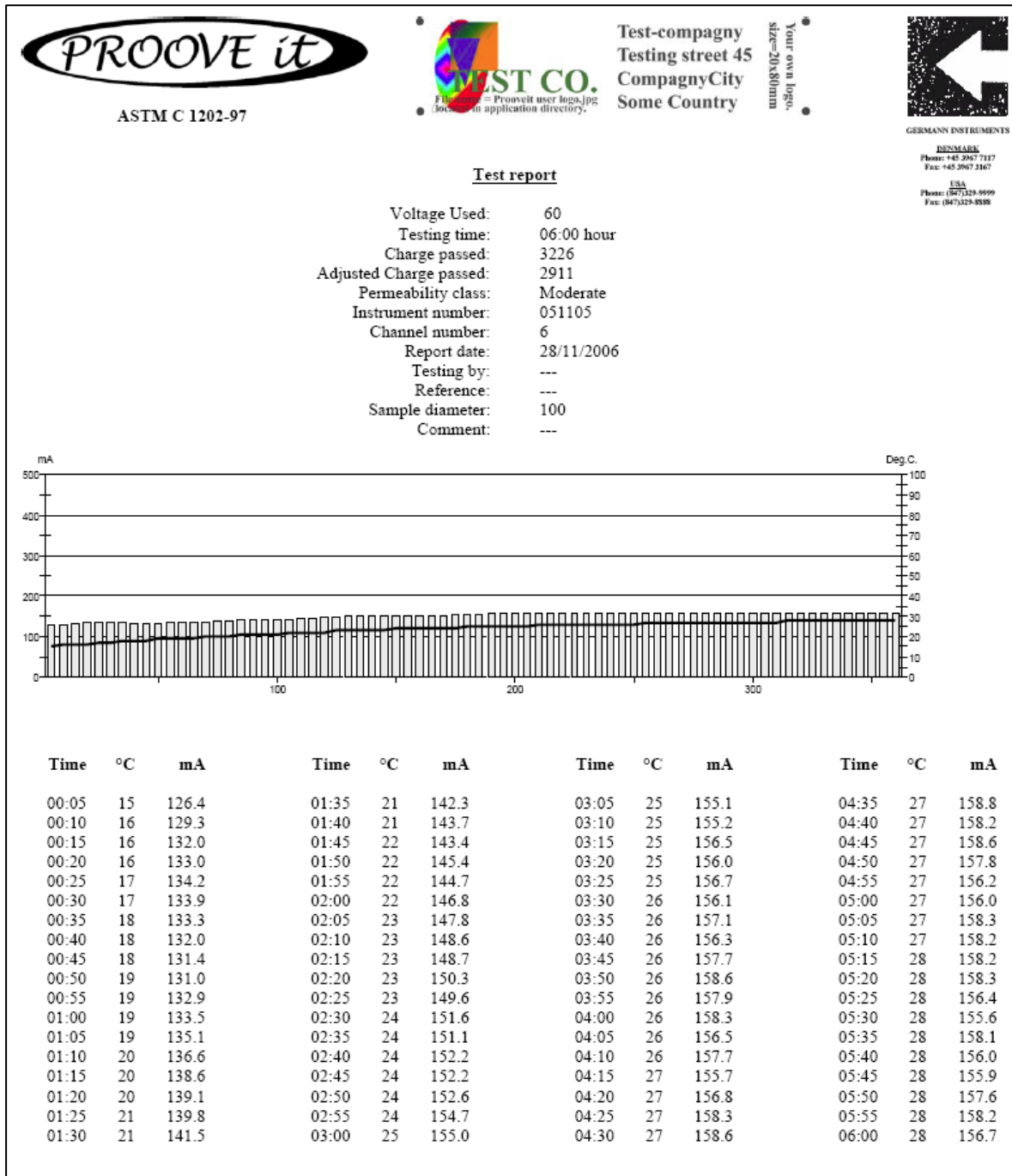
USA  
Phone: (847)323-9599  
Fax: (847)323-8988

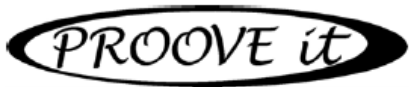
**Test report**

Voltage Used: 60  
Testing time: 06:00 hour  
Charge passed: 930  
Adjusted Charge passed: 839  
Permeability class: Very Low  
Instrument number: 051105  
Channel number: 2  
Report date: 24/04/2007  
Testing by: ---  
Reference: ---  
Sample diameter: 100  
Comment: ---



Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:05	22	38.2	01:35	23	39.6	03:05	25	43.2	04:35	26	46.4
00:10	22	38.6	01:40	24	39.8	03:10	25	43.3	04:40	26	46.6
00:15	22	39.1	01:45	24	39.9	03:15	25	43.6	04:45	26	46.6
00:20	22	39.2	01:50	24	40.3	03:20	25	43.7	04:50	26	46.5
00:25	22	39.1	01:55	24	40.5	03:25	25	43.8	04:55	26	46.7
00:30	22	38.8	02:00	24	40.6	03:30	25	44.0	05:00	26	46.8
00:35	22	38.8	02:05	24	40.8	03:35	25	44.2	05:05	26	46.9
00:40	22	38.9	02:10	24	40.9	03:40	25	44.3	05:10	26	47.3
00:45	22	38.9	02:15	24	41.2	03:45	25	44.6	05:15	26	47.4
00:50	23	38.9	02:20	24	41.3	03:50	25	44.9	05:20	26	47.5
00:55	23	38.9	02:25	24	41.4	03:55	25	45.0	05:25	26	47.5
01:00	23	38.7	02:30	24	41.8	04:00	25	45.1	05:30	26	47.6
01:05	23	38.8	02:35	24	42.1	04:05	25	45.4	05:35	26	47.7
01:10	23	38.8	02:40	24	42.2	04:10	25	45.6	05:40	26	47.9
01:15	23	38.9	02:45	24	42.4	04:15	26	45.8	05:45	26	48.0
01:20	23	38.9	02:50	24	42.6	04:20	26	45.8	05:50	26	48.2
01:25	23	39.2	02:55	25	42.9	04:25	26	46.1	05:55	26	48.2
01:30	23	39.5	03:00	25	43.0	04:30	26	46.2	06:00	26	48.2





ASTM C 1202-97



Test-compagny  
Testing street 45  
CompagnyCity  
Some Country

Your own logo,  
size=20x80mm



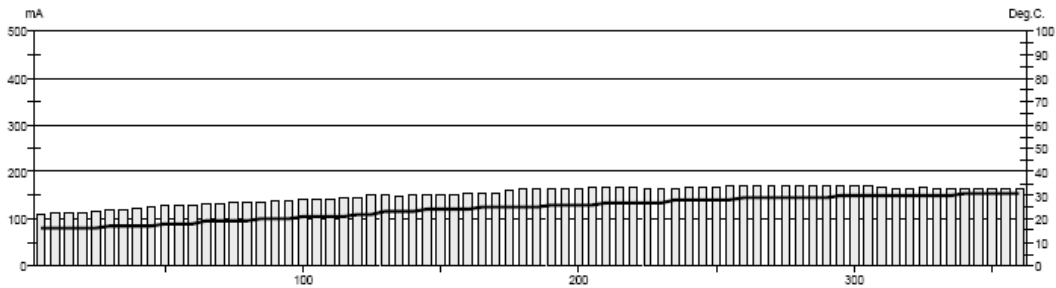
GERMANN INSTRUMENTS

DENMARK  
Phone: +45 2967 7117  
Fax: +45 2967 3167

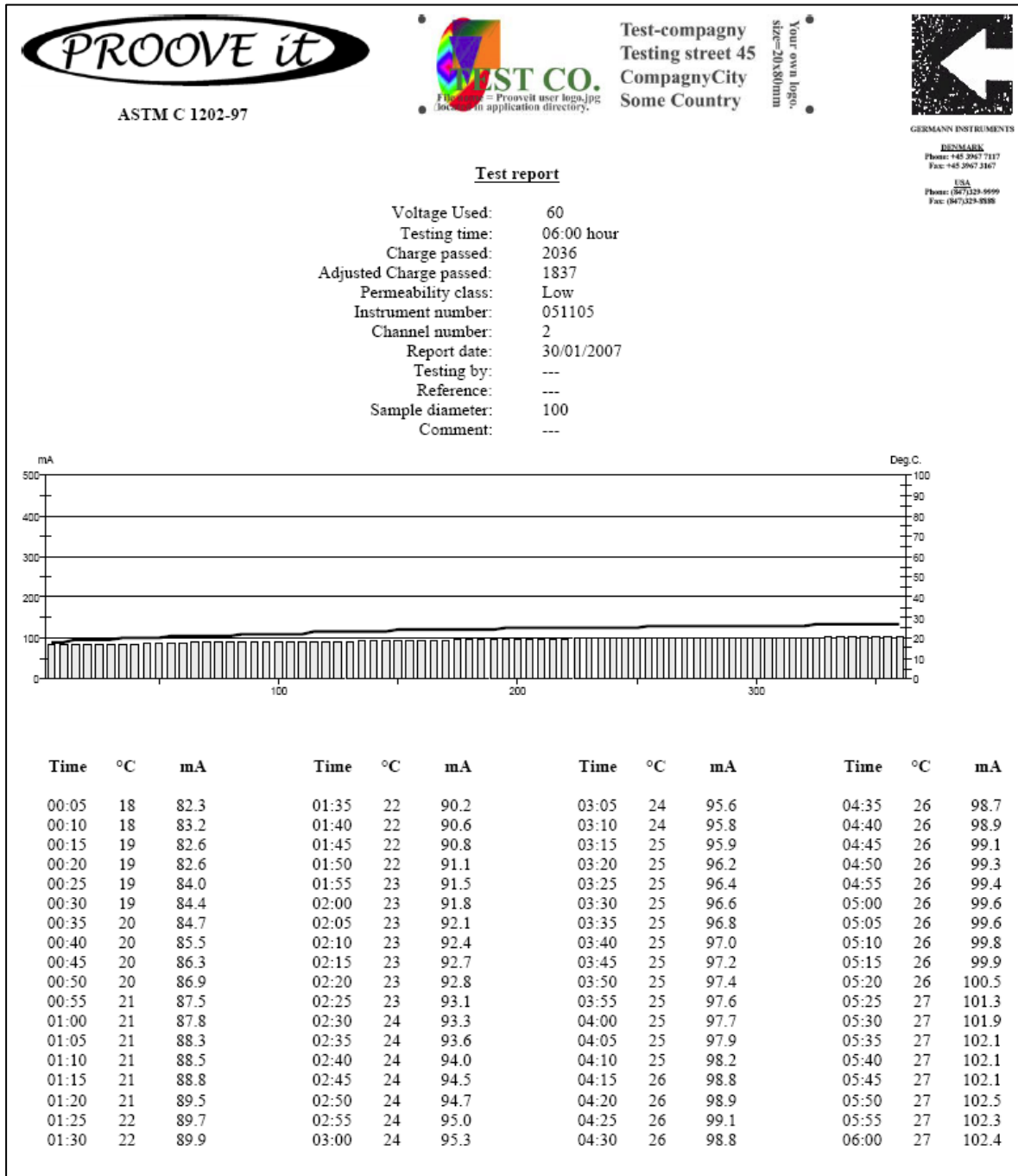
USA  
Phone: (947)323-9999  
Fax: (947)323-8338

**Test report**

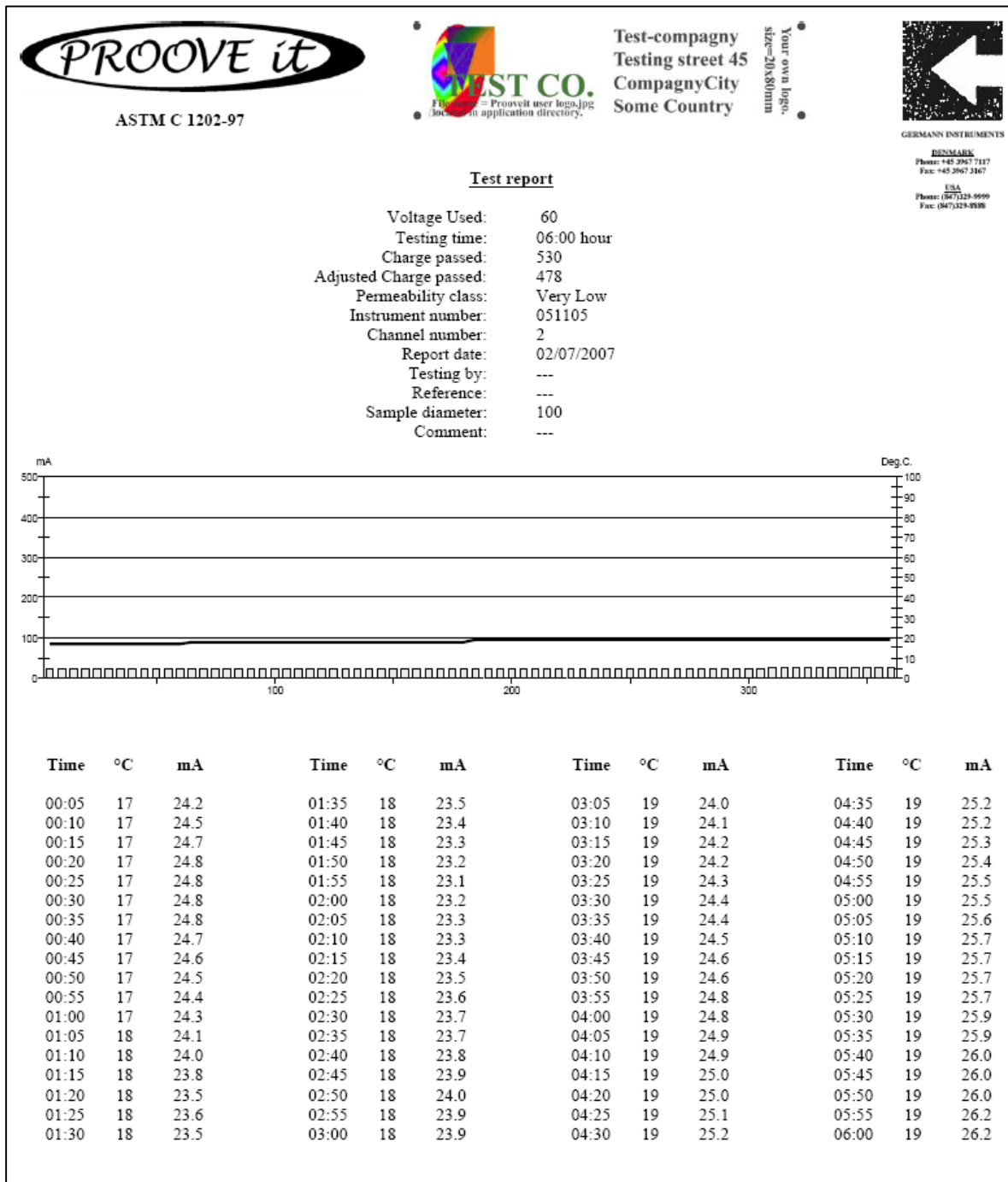
Voltage Used: 60  
Testing time: 06:00 hour  
Charge passed: 3279  
Adjusted Charge passed: 2959  
Permeability class: Moderate  
Instrument number: 051105  
Channel number: 4  
Report date: 12/05/2006  
Testing by: ---  
Reference: ---  
Sample diameter: 100  
Comment: ---



Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:05	16	109.1	01:35	20	139.5	03:05	25	163.6	04:35	29	169.3
00:10	16	112.8	01:40	21	140.9	03:10	26	164.7	04:40	29	169.5
00:15	16	113.2	01:45	21	142.3	03:15	26	165.4	04:45	29	169.8
00:20	16	114.0	01:50	21	143.6	03:20	26	166.1	04:50	29	169.9
00:25	16	116.2	01:55	21	145.4	03:25	26	167.1	04:55	30	170.3
00:30	17	118.1	02:00	22	145.2	03:30	27	167.6	05:00	30	170.1
00:35	17	121.3	02:05	22	151.0	03:35	27	168.4	05:05	30	170.2
00:40	17	122.1	02:10	23	151.0	03:40	27	168.4	05:10	30	166.6
00:45	17	124.3	02:15	23	147.4	03:45	27	163.3	05:15	30	165.3
00:50	18	127.7	02:20	23	148.6	03:50	27	162.0	05:20	30	164.6
00:55	18	127.7	02:25	24	149.7	03:55	28	165.8	05:25	30	166.6
01:00	18	128.1	02:30	24	151.1	04:00	28	166.3	05:30	30	164.8
01:05	19	131.1	02:35	24	152.4	04:05	28	167.0	05:35	30	164.3
01:10	19	130.9	02:40	24	153.2	04:10	28	168.4	05:40	31	163.6
01:15	19	133.1	02:45	25	153.8	04:15	28	168.8	05:45	31	164.1
01:20	19	134.8	02:50	25	154.4	04:20	29	168.8	05:50	31	163.8
01:25	20	136.5	02:55	25	160.7	04:25	29	169.1	05:55	31	163.6
01:30	20	138.0	03:00	25	162.4	04:30	29	169.4	06:00	31	163.4







## REFERENCIAS.

V.M. Malhotra y P.K. Mehta, 2002, High-performance, high-volume fly ash concrete, Ottawa, Canadá.

Enrique Pasquel Carbajal, 1998, Tópicos de tecnología del concreto, 2da edición, Colegio de Ingenieros del Perú, Lima, Perú.

Neville, A. M., Brooks, J. J., 1987, Concrete technology, 1ra edición, Ed. Jhon Wily & Sons Inc., Irlanda del Norte.

Jhon C. Ropke, 1982, Concrete problems, causes and cures, 1ra edición, Ed. McGraw Hill, United States of American.

A. Bilodeau y V.M. Malhotra, 1998, High-volume fly ash system: the concrete solution for sustainable development, For the presentation at the three-day CANMET/ACI International symposium on sustainable development of the cement and concrete industry, Ottawa, Canada.

N. Bouzoubaa y B. Fournier, 2002, Optimization of fly ash content in concrete Part I: Non-air-entrained concrete made whitout superplasticizer, Cement and Concrete Research Vol.33, pp. 1029-1037.

Aiqin Wang, Chengzhi Zhang y Wei Sun, 2003, Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash, Cement and Concrete Research Vol.33, pp. 2023-2029.

Rafat Siddique, 2003, Performance characteristics of high-volume class F fly ash concrete, Cement and Concrete Research Vol.34, pp. 487-493.

Jhon P. Baltrus y Robert B. LaCount, 2001, Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement, Cement and Concrete Research Vol.31, pp. 819-824.

Young-Soo Yoon, Jong-Pill Won, Sang-Kyun Woo y Young-Chul Song, 2001, Enhanced durability performance of fly ash concrete for concrete-faced rockfill dam application, Cement and Concrete Research Vol.32, pp. 23-30.

Rafat Siddique, 2002, Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete, Cement and Concrete Research Vol.33, pp. 539-547.

Cengiz Duran Atis, 2001, Heat evolution of high-volume fly ash concrete, Cement and Concrete Research Vol.32, pp. 751-756.

Charles Berryman, Jingyi Zhu, Wayne Jensen y Maher Tadros, 2004, High-percentage replacement of cement with fly ash for reinforced concrete pipe, Cement and Concrete Research Vol.35, pp. 1088-1091.

Vagelis G. Papadakis, 2000, Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash, Cement and Concrete Research Vol.30, pp. 1647-1654.

L. Llam, Y.L. Wong y C.S. Poon, 2000, Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement system, Cement and Concrete Research Vol.30, pp. 747-756.

N. Bouzoubaa, M.H. Zhang y V.M. Malhotra, 2000, Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements Compressive strength and resistance to the chloride-ion penetration of concrete, Cement and Concrete Research Vol.30, pp. 1037-1046.

Verbeck G, 1958, Carbonation of hydrated Portland cement, Cement and concrete special ASTM publication 205.

Zambetti G, 1982, Note sul calcestruzzo, Sika Italia.

H. Jan de Zeeuw y R.V. Abersch, 1980, Proceedings of 8<sup>th</sup> International conference on the utilization of fly ash and slag, p. 214, in Chinese.

S. Danshen y Z. Yinji, 1981, Inquiry of fly ash effects, J. Ceram. 9, pp. 57-63.

S. Danshen, 1989, The concrete of fly ash, Publishing house of Railway of China, Beijing, p. 152.

ASTM C 618 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

ASTM C 136 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.

ASTM C 33 Standard specification for concrete aggregates.

ASTM C 127 Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.

ASTM C 128 Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate.

ASTM C 29 Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate.

ASTM C 117 Standard test method for materials finer than 75  $\mu\text{m}$  (N<sup>o</sup> 200) sieve in mineral aggregates by washing.

ASTM C 311 Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete.

ASTM C 114 Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement.

ASTM C 430 Standard test method for fineness of hydraulic cement by the 45  $\mu\text{m}$  (N<sup>o</sup> 325) sieve.

ASTM C 109 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens).

ASTM C 188 Standard test method for density of hydraulic cement.

ASTM C 305 Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency.

ASTM C 1437 Standard test method for flow of hydraulic cement mortar.

NMX – C – 414 – ONNCE Industria de la construcción, cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba.

ASTM C 494 Standard specification for chemical admixtures for concrete.

ACI 211.1 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete.

ACI 232.2R Use of fly ash in concrete.

ASTM C 143 Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.

ASTM C 138 Standard test method for density (unit weight), yield and air content (gravimetric) of concrete.

ASTM C 231 Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method.

ASTM C 192 Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory.

ASTM C 617 Standard practice for capping cylindrical concrete specimens.

ASTM C 39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.

ASTM C 496 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.

ASTM C 469 Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.

ASTM C 157 Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete.

ASTM C 490 Standard practice for use of apparatus for the determination of change length of hardened cement past, mortar and concrete.

ASTM C 512 Standard test method for creep of concrete in compression.

ASTM C 1202 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.

ASTM C 1012 Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to sulfate solution.