

01146



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO

PRESENTADA POR:

ING. PATRICIA DEL ROCIO / CONTRERAS RODRIGUEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA
(CONSTRUCCION)**

DIRIGIDA POR:

M. EN I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

Ciudad Universitaria,

Junio del 2000

280799



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mi familia:

Por su amor y apoyo moral aún en la distancia, siempre han conseguido proveerme fortaleza en salir adelante a pesar de las adversidades.

A la Universidad:

Por todo lo que me brindó en mi época de estudiante.

A mi tutor:

El apoyo brindado y comprensión durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A mis amigos:

Por brindarme su amistad y cariño.

INDICE

	Pág.
DEDICATORIA	II
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. DEFINICION SEGÚN EL ACI	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. OBJETIVOS	3
1.4. ALCANCES	3
CAPITULO 2. MATERIALES COMPONENTES	
2.1. CEMENTANTES	5
2.2. AGREGADOS PÉTREOS	5
2.3. ADITIVOS	8
2.4. AGUA	9
CAPITULO 3. PROPORCIONAMIENTOS DE LA MEZCLA	
3.1. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO	11
3.2. ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS	12
CAPITULO 4. EFECTO DEL SUPERFLUIDIFICANTE EN EL CONCRETO	
4.1. EN ESTADO FRESCO	14
4.2. EN ESTADO ENDURECIDO	19

CAPITULO 5. RESULTADO DE ENSAYES

5.1.	MATERIALES DE CABECEO	23
5.2.	EFEECTO DE LA MICROSÍLICE EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN	24
5.3.	PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA MEDIANTE ENSAYES ACELERADOS	25
5.4.	CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO	25

CAPITULO 6. APLICACIONES

6.1.	BENEFICIOS DEL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO	30
6.2.	INVESTIGACIONES SOBRE EL TEMA DESARROLLADAS EN EL MUNDO	32
6.3.	DISEÑO ESTRUCTURAL Y LIMITACIONES SEGÚN DIVERSOS CODIGOS INTERNACIONALES	36
6.4.	NECESIDAD DE FUTURAS DE INVESTIGACIONES	37

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

Anexo I. Propuesta de método de prueba para fabricar, curar aceleradamente y ensayar a compresión el concreto en especímenes de prueba

Anexo II. Mediciones de la profundidad de carbonatación en el concreto endurecido

Apéndice A. Tablas

Apéndice B. Gráficas

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

El concreto de alto desempeño ha sido utilizado frecuentemente en países desarrollados, una muestra de ello ha sido la gran demanda en los últimos años en múltiples proyectos estructurales. En países en vías de desarrollo a medida que se incrementen los estudios en éstos concretos utilizando materiales locales, será mayor la difusión del conocimiento, por lo tanto se tendrán en cuenta en las futuras especificaciones.

El avance tecnológico de los concretos de alto desempeño sigue progresando día a día, y se estima que en los próximos años se podrá gozar, aún más de sus beneficios en la construcción de obras importantes en todo el mundo.

1.1. DEFINICIÓN SEGUN EL ACI

El **ACI** define al **concreto de alto desempeño** como un concreto que cumple con requisitos especiales de desempeño y uniformidad, y que no pueden ser obtenidos usando solamente materiales convencionales, procedimientos normales de mezclado, colocación y compactación, así como práctica de curados comunes.

1.2. ANTECEDENTES

El primer uso ampliamente difundido del concreto de alto desempeño (**CAD**), fue como concreto de muy alta resistencia (resistencia a compresión mayor de 420 kg/cm²), definido por el comité **ACI** para columnas de marcos en edificios de gran altura. Este tipo de concreto se generalizó en la década de los 80's a un gran número de aplicaciones, tales como puentes, pavimentos y estructuras marinas. Existen muchas posibles aplicaciones de los concretos de alto desempeño, pero en algunos lugares su utilización se excluye por la dificultad de disponer de

materiales adecuados para su elaboración, los cuales deben ser importados y esto hace que el concreto sea más costoso. También es importante señalar a que el concreto de alto desempeño tiene un mejor comportamiento a largo plazo que el concreto convencional, en lo referente a las propiedades físico - mecánica.

El concreto de alto desempeño es un concreto que proporciona beneficios a la construcción de estructuras de concreto. Entre las más significativas están:

- Facilidad de colocación y compactación sin afectar la resistencia.
- Propiedades mecánicas favorables a largo plazo.
- Alta resistencia temprana.
- Estabilidad de volumen.
- Mayor economía en el ciclo de vida de la estructura en ambientes agresivos.
- Reducción en los costos de mantenimiento.
- Disminución del volumen de materiales a utilizar debido a que se requieren menores secciones transversales y mejor uso del espacio

La desventaja más importante estriba en los elementos construidos con concreto de alto desempeño tienen un mayor costo inicial, debido a que como ya se ha dicho, requieren de materiales cementantes y aditivos químicos especiales que encarecen notablemente la construcción a corto plazo.

Se utilizan criterios de resistencia mecánica y durabilidad en la evaluación del diseño de los concretos de alto desempeño; siendo un factor predominante en la resistencia mecánica del concreto la baja relación agua/cemento (**a/c**) empleada. Los parámetros usuales en la evaluación de la resistencia mecánica del concreto son:

- Esfuerzo a compresión.
- Módulo de elasticidad.

- Contracción por secado.
- Deformación diferida.

La durabilidad puede ser definida como la capacidad del concreto de resistir la acción del medio ambiente sin afectar sus propiedades físicas y mecánicas. En este sentido los parámetros de evaluación utilizados con mayor frecuencia son:

- Resistencia al congelamiento y deshielo.
- Abrasión.
- Impermeabilidad a los cloruros.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo principal que se ha propuesto para este estudio es identificar los materiales componentes del concreto, así como las dosificaciones que conducen a los mejores resultados en las mezclas de concreto de alto desempeño, en cuanto a trabajabilidad y resistencia mecánica, así como determinar los parámetros que caracterizan a este material cuando se elabora con materiales comunes en el área metropolitana de la ciudad de México.

1.4. ALCANCES

Para alcanzar los objetivos propuestos y lograr fabricar CAD con materiales comunes en la zona metropolitana de la ciudad de México se desarrolló este trabajo bajo la dirección del M. en I. Carlos Javier Mendoza, investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM; con la presente investigación se evaluará el comportamiento estructural y el proceso constructivo de éstos concretos, para lo cual se realizó una serie de pruebas de laboratorio para incrementar los conocimientos existentes en el país sobre este tipo de concreto, teniendo en cuenta que existen muy pocos estudios sobre esta temática.

La etapa inicial incluyó el estudio de 46 mezclas de concreto, con el fin de evaluar el comportamiento de las variables involucradas (consumos de cemento y microsílíce, relación agua/cemento, revenimiento, consumo de aditivos fluidificantes de medio y alto rango) tomando en consideración recomendaciones que se brindan en investigaciones realizadas en países más avanzados (Estados Unidos, Canadá, Japón y Francia).

Para lograr en el estudio una respuesta eficaz del comportamiento de la resistencia a compresión ante el consumo de cementante, se ensayaron otras 6 mezclas utilizando bajos consumos de material cementante.

Paralelamente, se realizaron estudios a corto plazo (24 horas y 48 horas) que permitiera predecir la resistencia a compresión a 28 días de los CAD, se utilizaron especímenes cúbicos de 15 cm, aplicando el método desarrollado en el Instituto de Ingeniería para la verificación de la resistencia mecánica del concreto de forma acelerada.

A todas las muestras estudiadas se le determinaron las propiedades principales del concreto tanto en estado fresco (revenimiento, porcentaje de aire, peso volumétrico y temperatura) como en estado endurecido (resistencia a compresión). A las mezclas empleadas para caracterizar el material, adicionalmente se le determinaron resistencia a tensión, módulo de elasticidad, relación de Poisson, contracción por secado y deformación diferida.

CAPITULO 2

MATERIALES COMPONENTES

Para producir concretos de alto desempeño se requiere de una cuidadosa selección de los materiales a utilizar (cementantes, agregados pétreos y aditivos), así como un estricto control de calidad de los materiales componentes y del proceso de fabricación de la mezcla en sus diferentes etapas.

2.1. CEMENTANTES

Lo importante es seleccionar un cemento *portland* compatible con el aditivo reductor de agua de medio rango (fluidificante) o de alto rango (superfluidificante) en dependencia de la combinación que se utilice en la fabricación de la mezcla.

Se seleccionó como material cementante el cemento *portland* tipo I y una combinación de éste con microsilíce; la utilización de este tipo de cemento en la elaboración de las mezclas permite comparar los resultados de este estudio con los alcanzados en estudios similares en otros países.

2.2. AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos utilizados en el estudio fueron: arena andesítica y grava caliza, de procedencia local; estudios previos mostraron que la combinación de éstos materiales pueden tener un comportamiento estructural satisfactorio.

Con el objeto de determinar los parámetros requeridos en el proporcionamiento de las mezclas se realizaron pruebas físicas a los materiales tales como: granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico seco y suelto, así como de peso volumétrico seco y compacto.

2.2.1. Agregado Fino

El agregado fino utilizado fue de origen andesítico y se le sometió a un proceso de lavado (3 veces) y cribado para eliminar las partículas contaminantes y sobretamaños; en el estudio se utilizaron materiales de dos bancos de distinta procedencia; al primero de ellos se le hizo una corrección separando el 10 por ciento del retenido en la malla # 8 y el 5 por ciento del de la malla # 16 y al segundo el 15 por ciento del material retenido en la malla # 8 y el 10 por ciento del de la malla # 16; con ésta corrección la granulometría del agregado fino estuvo dentro de los límites recomendados que establece la norma *ASTM-C-33, Standard Specification for Concrete Aggregates*; en la misma se recomienda que:

- El agregado fino no debe tener más del 45 por ciento de total, retenido en dos mallas consecutivas.
- El módulo de finura debe encontrarse entre 2.30 y 3.10
- El material más fino que pasa la malla # 200 debe ser como máximo el 5 por ciento del total, para el caso de concretos no expuestos a la abrasión.

Cabe resaltar que este procedimiento no es práctico para llevarlo a nivel industrial, pero se pretendió tener en condiciones de laboratorio una arena que cumpliera con todos los requisitos establecidos, para poder alcanzar un comportamiento óptimo.

En las tablas 1 a 5 se presentan los estudios de la primera muestra de arena utilizada, a la cual se le realizaron las pruebas físicas antes mencionadas, dichos estudios se le realizaron a la arena: sin lavar, con una, dos y tres lavadas, así como con tres lavadas modificada.

En las tablas 6 y 7 se exponen los resultados obtenidos de las pruebas físicas realizadas a la segunda muestra de arena, en este caso el estudio se realizó para la arena con tres lavadas y tres lavadas modificadas.

En las figuras 1 a 3 se aprecian las curvas granulométricas obtenidas de las pruebas físicas de la arena utilizada.

De acuerdo a lo estudiado se puede concluir que el agregado fino procesado tuvo las siguientes características:

- Módulo de finura de 3.00
- Peso específico de 2.50
- Porcentaje de absorción de 3.80 por ciento.
- Partículas menores que la malla # 200 de 2.25 por ciento.

2.2.2. Agregado Grueso

Muchos estudios han mostrado que para obtener altos valores de resistencia a la compresión en el concreto, se tiene que emplear altos consumos de cemento, bajas relaciones agua/cemento, tamaños máximos de agregados gruesos menores de los que se emplean usualmente en los concretos de menores niveles de resistencia mecánica. Para éste estudio se escogió como agregado grueso una grava de origen calizo triturada de 9.5 mm (3/8") de tamaño máximo, lográndose muy buena adherencia con el mortero.

En la tabla 8 se presentan las pruebas físicas realizadas a la grava caliza.

En la figura 4 se observa la curva granulométrica obtenida de las pruebas físicas realizadas a la grava caliza.

Las características obtenidas de las pruebas físicas realizadas al agregado grueso permite asegurar que el material resulta adecuado para la elaboración de las mezclas de concreto deseadas; muestra de ello resultó ser que las curvas granulométricas obtenidas estuvieron dentro de los límites establecidos por la norma *ASTM-C-33*. Los resultados que se obtuvieron para la grava de origen calizo triturada de 9.5 mm (3/8") de tamaño máximo fueron:

- Peso específico de 2.70
- Porcentaje de absorción de 1 por ciento.

2.3. ADITIVOS

Los aditivos reductores de agua y minerales forman un papel importante en la elaboración del concreto de alto desempeño.

2.3.1. Aditivos Minerales

Para este estudio se utilizó un aditivo mineral hecho de microsilice compactada y seca (*microsilica* o humo de sílice), la misma está compuesta mayormente por silicio, SiO_2 (entre 85 y 98 por ciento); sus partículas esféricas son muy finas de entre 0.1 y 0.2 μm de diámetro y son 100 veces más finas que las partículas del cemento *portland*, su densidad específica es de aproximadamente 2.2 g/cm^3 .

La microsilice es considerada como la más eficiente de las puzolanas adecuada para la fabricación de los CAD; debido a su finura reacciona químicamente con la cal libre del cemento, de tal manera que incrementa la cantidad de gel de silicato de calcio, mejorando así el comportamiento de la fase cementante al aumentar su acción de adherencia con el agregado y el acero de refuerzo; por todo lo antes mencionado se produce un aumento significativo en la resistencia mecánica del concreto. La utilización de la misma ayuda a proteger al acero de refuerzo contra la corrosión; su baja permeabilidad impide el ingreso de los iones de cloro y reduce la conductividad eléctrica del concreto, impidiendo el proceso electroquímico de la corrosión. En el caso de ataque por sulfatos, la microsilice reduce el contenido de hidróxido de calcio y alúmina, el cual llega a ser incorporado en el hidrato de silicato de calcio.

Estudios realizados con anterioridad demuestran que la acción de la microsilice disminuyen los tiempos de fraguado e incrementan la demanda del

superfluidificante para una buena trabajabilidad de la mezcla. Otros estudios de laboratorio han demostrado efectos benéficos de este aditivo a corto plazo en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, sin embargo muy pocos de ellos se han concentrado en el comportamiento del mismo a largo plazo.

La microsilice empleada cumple con los requisitos descritos en la norma *ASTM-C-1240, Standard Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar*.

En este estudio se decidió utilizar porcentajes del 5, 10 y 15 por ciento de humo de silice para las distintas mezclas ensayadas, de acuerdo a recomendaciones seleccionadas de estudios consultados durante el desarrollo del trabajo.

2.3.2. Aditivos Químicos

En este estudio se utilizaron dos tipos de aditivos químicos:

- Reductor de agua de medio rango (PH) o aditivo fluidificante. Tipo A.
- Reductor de agua de alto rango (RH) o aditivo superfluidificante. Tipo F.

Ambos aditivos cumplen con los requisitos de la norma *ASTM-C-494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. El aditivo tipo F usualmente se utiliza para producir concretos de resistencia normal con bajo contenido de cemento, producir concretos fluidos, incrementar el revenimiento en las mezclas, así como para aumentar la resistencia a la compresión al disminuir la relación agua/cementante.

Se calcularon en el laboratorio las densidades de los aditivos, en este caso resultaron ser:

° 1.22 g/cm³ para el aditivo PH. ° 1.20 g/cm³ para el aditivo RH.

2.4. AGUA

Se utilizó agua potable, procedente del sistema de abastecimiento de la **UNAM**.

CAPITULO 3

PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

El proceso de dosificación de las mezclas de los CAD requiere ser más cuidadoso que el seguido para la dosificación de los concretos convencionales; por lo general se requiere la utilización de materiales cementantes adicionales al cemento *portland*, aditivos químicos, así como el considerar en dicha dosificación la baja relación agua/cemento. Algunos investigadores del tema han desarrollado un programa de cómputo, similar a un sistema experto, mediante el cual previa entrada de las características deseadas en el concreto se obtiene la dosificación adecuada de dicha mezcla.

Los agregados son de la mayor importancia cuando se requiere de resistencias superiores a 400 kg/cm^2 . En mezclas ricas, que es el caso de este estudio, es conveniente disminuir el tamaño máximo del agregado grueso y se recomienda la utilización de arena gruesa, esto último porque se ha demostrado que este tipo de mezclas tienen pasta suficiente para cubrir todas las partículas debido a su alto consumo de cemento. El hecho de utilizar en la elaboración de las mezclas relaciones agua/cemento consideradas como bajas, hace que se haga sumamente importante lograr una adecuada compactación ya sea mediante medios mecánicos o vibrado, dependiendo de la consistencia de la mezcla.

Entre las tablas 9 a 16 se muestran las dosificaciones, así como las características de las mezclas, las propiedades en estado fresco, además de los valores de la resistencia a compresión medidos a las edades de 24 horas y 28 días. A las mezclas 44 a 46 no se le hicieron pruebas a las 24 horas, en tanto que a las mezclas 1a 4 fueron a las únicas que se le hicieron pruebas aceleradas a las 48 horas. Es importante señalar que en estos ensayos no se encontró un incremento significativo en el desarrollo de la resistencia a la compresión de 24 a

48 horas, por lo cual se decidió no continuar con la prueba a las 48 horas de edad.

3.1. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El método de diseño de las mezclas empleado se llevó a cabo siguiendo una secuencia de pasos lógicos, todos ellos verificados y corregidos con anterioridad mediante ensayos a mezclas de pruebas de laboratorio. Esta metodología de diseño se realizó previa recopilación y consulta de material bibliográfico de estudios realizados recientemente en Francia, Australia, Canadá, Estados Unidos y Japón, países que han logrado desarrollar ampliamente su tecnología en la investigación y fabricación de concretos de alto desempeño.

Para las mezclas de este estudio se eligió un consumo promedio de cementante de 500 kg/m^3 , utilizando en el proceso de dosificación volúmenes absolutos.

Asimismo, y con el objeto de obtener la mejor combinación de arena y grava, se ensayaron mezclas preliminares con el fin de determinar mezclas adecuadas en cuanto a apariencia, consistencia y trabajabilidad. Finalmente se obtuvo como combinación satisfactoria de los agregados una mezcla de 43 por ciento de arena y 57 por ciento de grava.

Para los efectos del diseño de las mezclas se consideró un 3 por ciento de aire incluido dentro de la misma y para la determinación del mínimo volumen de agua que garantice el óptimo consumo de aditivo se consideró un volumen teórico de agua y aditivo a partir de los cuales se fueron realizando reducciones en el agua e incrementos en el consumo de aditivo superfluidificante.

Se trabajó con mezclas con revenimiento de 0 hasta 8.5 cm. antes de incorporar el aditivo y mezclas entre 10 y 25 cm de revenimiento, con el aditivo incluido.

3.2. ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS

El proceso que se siguió para el mezclado fue el que se expone a continuación: Primeramente se mezclaron los agregados, el material cementante y el agua, utilizando para ello un tiempo inicial de mezclado de 3 minutos, con posterioridad se le dio un tiempo adicional de mezclado de otros 3 minutos, después de haberla dejado en reposo durante 5 minutos. El aditivo fluidificante fue incorporado en los 3 minutos finales del mezclado. Inmediatamente después del mencionado tiempo de reposo, y luego de romper el fraguado falso se hizo la prueba de revenimiento, antes de la inclusión del aditivo fluidificante; después del tiempo final de mezclado y de la incorporación del aditivo se le determinaron a las mezclas las propiedades en estado fresco: revenimiento, contenido de aire, peso volumétrico y temperatura.

Con objeto de verificar el efecto de la secuencia en la incorporación del agua de mezclado, así como el empleo simultáneo de los dos aditivos fluidificantes utilizados en el estudio se hicieron mezclas que se presenta en la tabla 15, las modificaciones no produjeron resultados favorables.

Se moldearon 3 especímenes cúbicos y 3 cilíndricos; el colado de los especímenes cúbicos se realizó en dos capas, compactando cada una de ellas por vibración durante 20 segundos. En cambio, los cilíndricos se colaron en tres capas vibrándose durante 20 segundos por cada capa. Es importante señalar que al concreto empleado para la elaboración de los especímenes cúbicos se le adicionó un aditivo acelerante (cloruro de calcio), con el objeto de incrementar su resistencia a la compresión a la edad de 24 horas. Anexo I.

Los especímenes cilíndricos fueron almacenados en un cuarto de curado a temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa del 100 por ciento, hasta la fecha de ensayo de la resistencia a la compresión, que en este caso resultó ser de 28 días.

CAPITULO 4

EFFECTO DEL ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE EN EL CONCRETO

Los fabricantes de aditivo fluidificante recomiendan el consumo de aditivo en función de la cantidad de cemento que intervienen en las mezclas, sin embargo, es usual que esta información se refiera a los consumos usuales de cemento, en el intervalo de 300 a 400 kg/m³ de concreto debido a que los CAD requieren usualmente mayor consumo de cemento, del orden de 500 kg/m³, además de otros materiales cementantes, se juzgó conveniente estudiar el efecto de estos aditivos en la trabajabilidad de las mezclas.

En primer término se usó un aditivo fluidificante de rango medio (tipo A) empleando dosificaciones en el intervalo recomendado por el fabricante (0.25 a 1 por ciento del peso del cemento) y consumos de cemento de 485 y 510 kg/m³. Como se puede observar en las figuras 5 y 6 la efectividad del aditivo en la trabajabilidad de la mezcla, medida esta en función del revenimiento, es sensible a la cantidad de cemento utilizada. Las mezclas estudiadas tuvieron consumos de agua cercanos a 176 kg/m³.

Como era deseable mantener una alta trabajabilidad en las mezclas y reducir la relación agua/cemento, al mínimo posible, se ensayó también el efecto de un fluidificante de alto rango (tipo F) en la trabajabilidad del concreto. En la figura 7 se observa el efecto de los aditivos estudiados; a igualdad de consumo de cemento y consumos similares de aditivos se obtiene revenimiento parecido pero con consumo de agua mucho menor cuando se emplea fluidificante de alto rango. En la misma figura se puede observar que para consumos de aditivo de alto rango cercano a 2 por ciento del peso del cemento (10 kg/m³) se puede alcanzar altos revenimientos con consumo de agua de 140 kg/m³, lo que conduce a relaciones

agua/cemento del orden de 0.27, favorable para la adquisición de altas resistencias mecánicas.

Por lo antes comentado y dadas las ventajas que presenta el empleo del aditivo fluidificante de alto rango para los fines de estudio, se optó por emplear únicamente este aditivo para todas las mezclas siguientes.

En la figura 8 se puede apreciar la influencia del consumo de agua en el revenimiento en mezclas en las que se incorporó cemento *portland*, microsilice y un aditivo fluidificante de alto rango en cantidades constantes. Para las cantidades de materiales indicadas en la figura, que se pueden considerar típicas de un concreto de alto desempeño, se puede ver que para un consumo de agua de 168 kg/m³ se alcanza un revenimiento de 20 cm.

4.1. EN ESTADO FRESCO

A continuación se mencionan algunas características importantes de los aditivos fluidificantes en el concreto.

4.1.1. Compatibilidad

Los retardantes, los reductores de agua, los acelerantes y los aditivos minerales deben ser compatibles con los aditivos superfluidificantes, en el caso que se combinen entre ellos, por lo que se hace sumamente importante evaluar las combinaciones entre ellos antes de ser utilizados en la práctica. En éste estudio se verificó dicha compatibilidad.

4.1.2. Reducción de agua

De acuerdo con los fabricantes del aditivo reductor de agua de medio rango es posible reducir el agua a utilizar en la dosificación de la mezcla entre un 5 y 15 por ciento y para el aditivo de alto rango empleado se reduce el agua entre 15 y 35 por ciento, dependiendo de la dosis del aditivo empleado, así como de la

magnitud del revenimiento inicial. Es importante aclarar que por lo general el porcentaje de reducción del agua aumenta con el incremento en el contenido de cemento.

Se pudo verificar que los aditivos empleados estuvieron en el rango del porcentaje de reducción especificado.

4.1.3. Trabajabilidad

La propiedad que tiene la mezcla de concreto de brindar facilidad en su manejo, colocación y acabado se conoce comúnmente con el nombre de trabajabilidad, maniobrabilidad o manejabilidad; la misma depende de la consistencia de la mezcla y ésta es medida usualmente mediante el ensayo del revenimiento, cuando la fluidez es alta es usual cuantificarla por medio de la llamada mesa de fluidez (Código *DIN* 1045).

La pérdida prematura de la trabajabilidad en las mezclas de concreto de alto desempeño es considerada frecuentemente como un problema sumamente importante, debido a que la trabajabilidad se ve reducida debido a la demora en la adición de aditivos reductores de agua de alto rango, o por el ajuste de la dosis de aditivos en el sitio de trabajo. Esto se ha demostrado por medio de estudios realizados por múltiples investigadores quienes señalan que pequeños cambios en el contenido de agua afecta notoriamente el control de la trabajabilidad de los CAD.

En este estudio la mayoría de mezclas analizadas presentaron una adecuada trabajabilidad, a excepción de las mezclas 5 que tuvo bajo consumo de aditivo de medio rango (PH) y relación agua/cemento baja, la mezcla 12 que estaba muy seca debido a la muy baja relación a/c de 0.27, así como la mezcla 49 con aditivo reductor de agua de alto rango (RH) y 5 por ciento de humo de sílice.

4.1.4. Temperatura

Se pudo observar en casi todas las mezclas que las temperaturas se mantuvieron constantes entre 20 y 22°C, a menores cantidades de cemento la temperatura disminuyó en el rango de 3 a 5°C.

En la aplicación del método de curado acelerado se registró en los concretos temperaturas muy altas entre 38 y 46°C debido al proceso de hidratación del cemento.

4.1.5. Peso volumétrico

La relación entre los pesos volumétricos de las mezclas de concreto con aditivo superfluidificante y las mezclas que no tenían este tipo de aditivo resultó ser como promedio, igual a 1.01.

Se pudo observar que en las mezclas con aditivo superfluidificante y humo de sílice no tuvieron variación significativa en su peso volumétrico.

4.1.6. Pérdida de revenimiento

La pérdida de revenimiento puede ser afectado por distintos factores, entre los que se pueden mencionar:

- El tipo de aditivo.
- La dosificación empleada.
- La utilización simultánea de varios tipos de aditivos.
- El tipo y la marca del cemento utilizado.
- La clase de concreto.
- Temperatura.
- Tiempo.

La mayoría de estos factores pueden ser controlados por el usuario; la pérdida de revenimiento era una situación muy común cuando se utilizaron los primeros aditivos superfluidificantes; sin embargo el uso de la nueva generación ha logrado

superar este problema, salvo en el caso del empleo de los mismos en condiciones climáticas extremas.

Se observó que en mezclas con aditivo superfluidificante RH y humo de sílice después de 2 horas de haber elaborado la mezcla perdía rápidamente el revenimiento.

4.1.7. Segregación y sangrado

La segregación no es más que la separación de los componentes de la mezcla debido a la diferencia de tamaño existente, así como por la gravedad específica (los materiales mas pesados se van al fondo). La segregación es un fenómeno bastante perjudicial, ya que va en contra de la homogeneidad de la mezcla de concreto deseada.

Una forma particular de segregación es el sangrado; en la cual parte del agua del mezclado se eleva a la superficie del concreto fresco, manifestándose una heterogeneidad en cuanto a humedad en la mezcla considerada. Generalmente el sangrado disminuye cuando disminuye la relación agua/cemento. Esto se ha verificado para concretos tipo I, II y V.

En concretos con aditivos superfluidificante usualmente no ocurren ni la segregación ni el sangrado; sin embargo la incorporación repetitiva del aditivo a una misma mezcla pueden generar con frecuencia que estos fenómenos se produzcan.

La mezcla 11 presentó segregación y sangrado, debido a la gran cantidad de aditivo superfluidificante, también observamos cambio de color en el concreto.

4.1.8. Contenido de aire

En numerosas publicaciones se comenta que en pruebas de laboratorio se ha demostrado que el porcentaje de vacíos o de aire incluido en el concreto se altera

con la adición de aditivos superfluidificantes. Sin embargo en este estudio se observó que al utilizar el aditivo superfluidificante RH no se provocó en la mezcla un incremento en el contenido de aire mayor del 3%; sólo se apreció algo distinto en la mezcla 7; la misma tenía un aditivo reductor de agua PH que provocó un incremento notable del contenido de aire del 6.7%, concretamente ésta mezcla tuvo tres veces más aire que las otras mezclas estudiadas; esto se le atribuye al exceso de aditivo dosificado.

4.1.9. Acabado

El acabado del concreto depende en gran medida de la percepción de la persona que trabaja la mezcla. El concreto de alto desempeño se caracteriza por ser un concreto "pegajoso" y "gravudo"; debido al gran contenido de materiales cementantes con que se elabora, a las grandes dosis de aditivos químicos que se le suministran y por supuesto al volumen de aire incluido en el interior de la mezcla; todo ello contribuye enormemente a que se dificulte el proceso de acabado con la mezcla de concreto terminada.

No se conoce hasta ahora ninguna prueba estandarizada que permita comprobar el acabado de la mezcla de concreto obtenida, por lo cual se hace necesario emprender estudios e investigaciones al respecto que permitan cuantificar este importante aspecto.

En este estudio muy pocas mezclas analizadas resultaron tener la característica de ser pegajosas y/o rocosas (mezclas 10, 11 y 12).

4.1.10. Curado

El concreto de alto desempeño se caracteriza por tener bajo sangrado, esto debido en gran medida a la baja relación agua/cementante que poseen estos tipos de concretos, así como al alto calor de hidratación, resultante de los altos consumos de cementantes. A su vez este bajo sangrado trae como consecuencia

que se produzca un rápido secado en la superficie exterior del elemento colado, produciéndose como consecuencia agrietamiento en el concreto. Para tratar de contrarrestar este efecto se hace sumamente importante seguir apropiadamente las prácticas recomendadas para el curado, tanto en tiempo como en forma de aplicación. El comité ACI recomienda medidas de protección especiales para el caso en que la velocidad de evaporación excede $0.5 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$, especialmente para aquellas mezclas que contienen humo de sílice.

Material bibliográfico de Estados Unidos consultado comentan la demostración estadística que el 72 por ciento de los contratistas usan algún tipo de protección durante el curado, el 26 por ciento usan compuestos químicos y solamente el 2 por ciento no utilizan protección durante las primeras 24 horas. En nuestro país son pocos los que realizan prácticas de curado correctas, generalmente no curan el concreto, ocasionando agrietamientos.

Las muestras elaboradas con cloruro de calcio para la prueba acelerada de resistencia se le dio un curado adiabático según lo establece el método utilizado y a los cilindros restantes se le dio un curado estándar, después de 24 horas de fabricados.

4.2. EN ESTADO ENDURECIDO

4.2.1. Propiedades de resistencia

Con el empleo del concreto de alto desempeño se obtiene mayores resistencias mecánicas del concreto. Algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- Aumento de la resistencia a la compresión.
- Aumento de la resistencia a la flexión.
- Aumento de la resistencia a la tensión.
- Incremento en el módulo de elasticidad.

Estas mejoras están asociadas directamente con la reducción en la relación agua/cementante, propiciada por la acción del aditivo superfluidificante y el empleo de altos consumos de cementante.

4.2.2. Durabilidad

Numerosas investigaciones desarrolladas en Europa, Estados Unidos, Canadá y Japón han demostrado que el uso de aditivos superfluidificante y humo de sílice mejoran notablemente las propiedades de durabilidad del concreto, algunas de estas propiedades se mencionan a continuación.

- Resistencia a ciclos repetitivos de congelamiento y deshielo.
- Resistencia al ataque de sulfatos.
- Resistencia a la corrosión en el acero de refuerzo.
- Resistencia a la abrasión.

Aunque en esta investigación no se abordó el estudio referente a la durabilidad del concreto, se hará referencia muy brevemente a algunos aspectos básicos que exponen algunos códigos internacionales importantes.

4.2.2.1. Método de congelamiento y deshielo (ASTM-C-666)

Una causa de la baja durabilidad del concreto en clima frío es el congelamiento y deshielo del concreto endurecido saturado y que, al presentarse en forma cíclica daña progresivamente al concreto desintegrándolo.

Cuando los poros capilares de la pasta de cemento del concreto están parcialmente saturados y se congela el agua se provoca un aumento de volumen de aproximadamente 9%. El congelamiento ocurre gradualmente en tal forma que el agua, aún no congelada en los capilares, está sujeta a presión hidráulica, principalmente por el incremento del volumen del agua al irse formando el hielo.

Esta presión sino se disminuye, origina esfuerzos de tensión, que si la pasta de cemento no los puede soportar se agrietará. Esto puede ocurrir en capilares completamente saturados en los cuales no puede haber movimiento del agua al iniciarse el congelamiento. Al ocurrir el agrietamiento, aparecen nuevos espacios inmediatos al capilar, los cuales se saturan en el nuevo ciclo incrementándose el volumen de agua congelable. Los ciclos de congelamiento y deshielo tienen un efecto acumulativo de deterioro en el concreto.

El ensaye *ASTM-C-666* somete al concreto a ciclos de congelamiento y deshielo aplicados rápidamente uno tras otro. Un ciclo se define como una disminución de la temperatura a -2.2°C o menos, seguido por un ciclo de deshielo.

Estudios han comprobado que el empleo de aditivo superfluidificante combinado con microsilíce mejora la resistencia al congelamiento y deshielo en el concreto, hasta el punto que logra resistir aproximadamente 300 ciclos de congelamiento y deshielo sin que haya un deterioro considerable en el elemento ensayado.

4.2.2.2. Resistencia a la abrasión (*ASTM-C-944*).

El *ACI 116* define la abrasión como las acciones de desgaste derivadas de la fricción y el frotamiento, la resistencia a este proceso depende de 3 aspectos básicos: la resistencia intrínseca de los agregados, a las acciones abrasivas y su composición granulométrica; la resistencia mecánica del concreto (compresión) y los diferentes aspectos prácticos involucrados en el uso del concreto y la ejecución de la obra.

4.2.2.3. Permeabilidad a los cloruros (*ASTM-C-1202* ó *AASHTO-T-277*).

Mediante este estudio se puede determinar la conductividad eléctrica del concreto, por medio de la cual se puede obtener una rápida indicación de la resistencia del mismo a la penetración del ion cloruro.

La prueba *ASTHO-277* es una de las más utilizadas para medir la permeabilidad del concreto a los cloruros. Se estima midiendo la carga total (*Coulomb*) que pasa a través del espécimen 95 mm de diámetro y 50 mm de espesor, mantenido bajo un voltaje de corriente eléctrica de 60 V durante 6 horas. Estudios han demostrado que utilizando superfluidificante y microsilice en bajas relaciones agua/cementante (<0.35) en concretos de alto desempeño, la carga total después de 6 horas está generalmente abajo de 1000 *Coulomb*, el cual es muy bajo de acuerdo a la escala de referencia que establece la *ASTHO* que es la siguiente:

<u>Coulombs</u>	<u>Permeabilidad</u>
> 4000	alta
2000-4000	moderado
1000-2000	bajo
100-1000	muy bajo
<100	insignificante

4.2.2.4. Profundidad de carbonatación

En ausencia de cloruros, la velocidad de carbonatación del concreto está en función de la porosidad y de la permeabilidad del concreto. A través de esta prueba se puede determinar la profundidad de la capa carbonatada en la superficie del concreto endurecido por medio de un indicador, para ello se utilizan testigos fabricados en laboratorio o especímenes extraídos de estructuras terminadas.

No existe una norma establecida para determinar la profundidad de carbonatación pero existen varias recomendaciones; en el Anexo II se menciona una de ellas.

CAPITULO 5

RESULTADOS DE ENSAYES

5.1. MATERIALES DE CABECEO

Se entiende como "cabeceo" a la preparación de las bases de los especímenes de concreto, para realizar la prueba de resistencia a compresión, con mortero hecho de azufre y diferentes materiales muy finos, en concretos normales se siguen las recomendaciones que establece la NMX-C-109.

El empleo de azufre normal para el cabeceo de los especímenes del CAD provoca que los resultados de las pruebas de resistencia a compresión se dispersen, debido a que la capa de cabeceo es más débil que el CAD, por lo tanto ésta falla primero.

Para evitar este problema se llevó a cabo una serie de estudios utilizando una combinación de distintos porcentajes de arena andesítica y azufre (cubos de 5 x 5 x 5) y resultó un mortero con características favorables de trabajabilidad y resistencia para realizar el cabeceo de los especímenes cilíndricos a 28 días.

El proceso de elaboración fue el siguiente:

Se puso al fuego la cantidad determinada de azufre y se mezcló hasta derretirse por completo, luego se agregó poco a poco el porcentaje de arena estimado, mezclando constantemente hasta que formara una pasta ligeramente fluida; a continuación se procedió a cabecear los cilindros. Se recomienda reutilizar el mortero de azufre hasta por 15 veces.

En la tabla 17 se presentan los resultados de las distintas combinaciones del mortero que se ensayaron en este estudio.

5.2. EFECTO DE LA MICROSÍLICE EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En estudios previos se ha visto el efecto benéfico de la microsilice en las propiedades del concreto, sobre todo en relación con la durabilidad. Sin embargo, dado que los porcentajes de microsilice empleados usualmente en el concreto varía en un amplio intervalo es deseable determinar la proporción óptima de su incorporación en el concreto.

En la figura 9 se presenta una gráfica que ilustra la variación de la relación agua/cementante con la resistencia a compresión del concreto a 28 días de edad. El cementante es una combinación de cemento *portland* con diferentes porcentajes de microsilice, desde 0 hasta 15 por ciento del peso del cemento *portland*. Como se puede observar la inclusión de microsilice siempre resulta benéfica y entre los diferentes porcentajes estudiados el 5 por ciento da los mejores resultados en cuanto a resistencia a compresión. Por otro lado, siendo la microsilice un producto de importación, y por tanto más caro que los otros componentes es conveniente emplearla en la cantidad óptima. Por estas razones se escogió este porcentaje de microsilice para los subsiguientes ensayos de este estudio. Cuando la durabilidad sea el aspecto más importante a lograr los consumos de microsilice deben ser del orden de 10 por ciento.

Por otra parte, se requiere conocer qué consumos de cementante resultan más adecuados en cuanto a la resistencia mecánica. En la figura 10 se presenta una relación entre el contenido de cementante en las mezclas y la resistencia a compresión que se alcanza con ellas. Como se puede observar las mayores resistencias se alcanzaron cuando se tuvieron consumos de cementante del orden de 500 kg/m^3 con un porcentaje de microsilice de 5 por ciento.

5.3. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA MEDIANTE ENSAYES ACELERADOS

Al aplicar el método de curado acelerado desarrollado en el Instituto de Ingeniería para predecir la resistencia del concreto normal a 28 días con base a la información obtenida a 24 horas de edad, se observó que cuando los consumos de cemento son relativamente altos, del orden de 500 kg de cemento por metro cúbico de concreto, se alcanzaron resistencias a compresión a edad temprana en el mismo orden que la obtenida a los 28 días de edad. Debido a que los CAD tienen consumo de cementante del mismo orden resulta de interés determinar si en estos concretos, donde el cementante está compuesto de cemento portland y microsílíce, se conserva la misma tendencia.

En la figura 11 se presenta relaciones entre resistencias a compresión a 24 horas y 28 días para varios consumos de cementantes y diferentes porcentajes de microsílíce. Se puede observar en estos concretos que la microsílíce no logra reaccionar a muy corto plazo, por lo que las resistencias a compresión a 24 horas obtenidas con el método acelerado son menores que las correspondientes a 28 días con curado normal. Lo anterior no significa que el método de predicción de resistencias no sea aplicable, sino que la proporción de resistencia alcanzable a las 24 horas es menor al estimado con anterioridad.

5.4. CARACTERIZACION DE LOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO

Definida la potencialidad de los CAD en cuanto a trabajabilidad de las mezclas y la resistencia a compresión, resulta conveniente determinar los otros parámetros asociados a estos concretos fabricados con cemento *portland* tipo I, microsílíce (5 por ciento del cemento), grava caliza (10 mm de tamaño máximo), arena andesítica lavada, aditivo fluidificante de alto rango (tipo F, 5 kg/m³) y agua de la red de agua potable de la ciudad (167 kg/m³, aproximadamente), tabla 18.

5.4.1. Incremento de la resistencia a compresión con la edad

Se hicieron pruebas de resistencia a compresión a 28 días, 91 y 119 días de edad, tabla 18, y con los resultados alcanzados se determinaron los incrementos de resistencia respecto a la de 28 días, figura 12. La expresión encontrada para estimar la resistencia probable del concreto a cualquier edad respecto a la de 28 días resulta ser:

$$(f'c)_t = (5.6)^{t/100} (f'c)_{28}$$

Donde:

$(f'c)_t$, resistencia a compresión del concreto a t días después del colado, kg/cm²
t edad en días a la que se desea estimar la resistencia

$(f'c)_{28}$ resistencia a compresión del concreto a 28 días después del colado, kg/cm²

A la edad de 1 año (365 días) es de esperarse que se alcance una resistencia a compresión 23 por ciento más alta que la obtenida a 28 días de edad.

5.4.2. Resistencia a tensión por flexión e indirecta

En la literatura técnica sobre el tema es usual encontrar expresada la resistencia a tensión del concreto en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión. Con los resultados de los ensayos efectuados en concretos con 28 días de edad, tabla 18, se establecieron las relaciones que se presentan en la figura 13. Independientemente del nivel de resistencia a tensión que se alcanza con estos concretos, el parámetro que relaciona la resistencia a tensión con la de compresión resulta alto en comparación con el alcanzado en concretos comunes, lo cual implica que existe una muy buena adherencia entre los agregados y la pasta cementante. Por otro lado siendo elevados los niveles de resistencia a compresión que se obtienen con estos concretos también resultan elevados los niveles de resistencia a tensión alcanzados.

Las expresiones que permiten relacionar la resistencia a tensión con la resistencia a compresión resulta ser:

Tensión por flexión:

$$f_t = 3 \cdot f'_c$$

Tensión indirecta:

$$f_t = 1.8 \cdot f'_c$$

siendo:

f_t	resistencia a tensión por flexión, en kg/cm ²
f_t	resistencia a tensión indirecta, en kg/cm ²
f'_c	resistencia a compresión a 28 días, en kg/cm ²

5.4.3. Módulo de elasticidad

Otro parámetro frecuentemente utilizado en el diseño estructural es el módulo de elasticidad del concreto. En la tabla 18 se encuentra información que permite relacionar la resistencia a compresión del concreto con el módulo de elasticidad obtenidas a edades de 28, 91 y 119 días. En la figura 14 se presenta estos resultados y como se puede observar los valores alcanzados se relacionan entre sí independientemente de la edad que tenga el concreto cuando se realiza la prueba. En los concretos en general existe una tendencia a incrementarse el módulo de elasticidad con el incremento en la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

Este comportamiento es usual observarlo para resistencia a compresión hasta del orden de 500 kg/cm², después de la cual hay una tendencia a mantenerse constante el módulo de elasticidad. Para los CAD utilizados en este estudio, la tendencia de aumentar el valor del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión se mantuvo hasta para f'_c del orden de 600 kg/cm² después de los cuales nuevamente se presenta esta tendencia de permanecer constante el módulo de elasticidad aunque se incremente la resistencia a compresión.

La expresión que permite relacionar la tendencia media de estos resultados es:

$$E_c = 14,500.00 \cdot f'_c$$

Siendo:

E_c módulo de elasticidad del concreto, en kg/cm^2

f'_c resistencia a compresión del concreto a la edad de ensaye, en kg/cm^2

La desviación estándar (σ) encontrada para los 18 resultados analizados es:

$$\sigma = 750 \sqrt{f'_c}$$

Siendo:

σ desviación estándar, en kg/cm^2

f'_c resistencia a compresión, en kg/cm^2

5.4.4. Relación de *Poisson*

Para la determinación de la relación de *Poisson* de los concretos estudiados se hicieron ensayos a 28, 91 y 119 días de edad. Los resultados se presentan en la tabla 18, figura 15 y como se puede observar existe cierta tendencia a variar de valor con la resistencia a compresión, no así con la edad de ensaye. Sin embargo, debido a la dispersión de los resultados se estima que para fines prácticos, resulta suficiente considerar un valor único para la relación de *Poisson*, correspondiente al valor medio e igual a 0.24. En las figuras 16 a 21 se presentan las relaciones esfuerzo-deformación unitaria, correspondientes a las mezclas A a la F, ensayadas a los 28 días de edad.

5.4.5. Contracción por secado

En la estimación de los valores de la contracción por secado última (ϵ_{cs}) esperada para las mezclas en estudio se tomaron registros hasta por lo menos 210 días de exposición al ambiente seco. En las figuras 22 a la 27 se puede observar los valores alcanzados así como las expresiones que permiten relacionar el valor de contracción con el tiempo de exposición transcurrido. Cuatro de las mezclas incluyen cinco por ciento de microsilíce y dos no. Los valores de contracción última esperada se indican en la tabla 19.

Como se observa las contracciones últimas varían en un intervalo estrecho, entre 445×10^{-6} a 588×10^{-6} , correspondiente a mezclas que no incluyeron microsilice en sus componentes. Entre las que si tuvieron microsilice las contracciones por secado variaron entre 458×10^{-6} y 549×10^{-6} .

En la figura 28 se relacionan los valores de contracción por secado con el consumo de cementante y se observa que los valores menores de contracción se alcanzaron para consumos de cementante de 400 kg/m^3 . Cabe mencionar que los valores obtenidos para las contracciones últimas son menores que los alcanzados en concretos fabricados con agregados pétreos similares, pero para concretos comunes y resistencia mecánica menores.

5.4.6. Coeficiente de deformación diferida

La deformación diferida se determina en este estudio en función de su coeficiente el cual se expresa como la relación entre la deformación diferida y la instantánea, siendo la deformación diferida igual a la deformación total en el tiempo menos la deformación instantánea.

Se hicieron determinaciones en tres mezclas de concreto con diferentes consumos de cementante, 350 , 400 y 500 kg/m^3 de concreto. En las figuras 29 a 31 se muestra la tendencia observada para estos concretos, respectivamente. Asimismo, en la figura 32 se representa la tendencia de la variación observada de los coeficientes en función del consumo de cementante. Al igual que el caso de la contracción por secado, el valor menor del coeficiente de deformación diferida se alcanzó para consumo de cementante de 400 kg/m^3 de concreto. En general los valores correspondientes a los concretos de alto desempeño resultaron menores a los obtenidos en concretos comunes, fabricados con materiales similares, pero para un intervalo de resistencia mecánica inferior.

CAPITULO 6

APLICACIONES

6.1. BENEFICIOS DE LOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO

Mediante la siguiente tabla se muestran los principales beneficios y aplicaciones que se obtienen con el uso de los Concretos de Alto Desempeño.

BENEFICIOS	APLICACIONES
a) Mejoramiento en las propiedades mecánicas del concreto	
<ul style="list-style-type: none"> • Incremento acelerado de la resistencia a la compresión del concreto. • Alta resistencia a la compresión a largo plazo. • Elevado módulo de elasticidad del concreto a largo plazo. • Alta resistencia a la tensión del concreto a largo plazo. • Incremento en la ductilidad del material debido al incremento del módulo de elasticidad. • Contracción y deformación diferida controlada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Construcciones que se desean realizar en un tiempo breve. • Construcciones de gran altura. • Puentes de grandes claros. • Edificaciones en zonas de alto riesgo sísmico. • Vigas y losas presforzadas. • Pavimentos • Estructuras sanitarias. • Vigas y Losas de pisos. • Fabricación de concreto de contracción compensada. • Reparaciones estructurales.
b) Mejoramiento en la durabilidad	
<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en la protección del acero de refuerzo contra la corrosión. • Incremento en el ciclo de vida de la estructura a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pavimentos, puentes, garajes, sistemas de aprovisionamiento de agua, construcciones marinas. • Contenedores para residuos nucleares y tóxicos.
c) Mejoramiento en la construcción	
<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades de colocación controlada. • Curado controlado. • Colocación en condiciones ambientales severas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sótanos, concreto residencial. • Pavimentos, pisos de bodega, construcción residencial. • Extensión en el tiempo de construcción (invierno y verano), construcción tropical, construcción en el ártico.

Cabe mencionar que el costo del CAD con características de alta resistencia y durabilidad es 3 veces mayor respecto a un concreto normal, pero a largo plazo es más económico debido a que el costo de mantenimiento de la construcción se reduce de manera importante. A continuación se presenta un ejemplo a manera de referencia para estos casos, cabe aclarar que dependiendo de la estructura puede sufrir incrementos o decrementos respecto al ejemplo mostrado.

MATERIALES	NORMAL	CAD
<i>Resistencia especificada (kg/cm²)</i>	350	700
Componentes		
Cemento (\$/m ³)	385.00	525.00
Arena (\$/m ³)	60.00	70.00
Grava (\$/m ³)	80.00	100.00
Agua (\$/m ³)	10.00	10.00
Aditivo 1 (\$/m ³)	28.00	-
Aditivo 2 (\$/m ³)	-	188.00
Microsilice o humo de sílice (\$/m ³)	-	788.00
T O T A L (\$/m³)	563.00	1681.00

6.2. INVESTIGACIONES SOBRE EL TEMA DESARROLLADAS EN EL MUNDO

6.2.1. ASIA Y OCEANÍA

Tailandia: La experiencia con el concreto de alto desempeño indica que la trabajabilidad fue lo más importante seguido por la alta resistencia. En estos momentos ambos aspectos son combinados en la producción de estos concretos; así se han logrado producir CAD a escala de laboratorio y a escala comercial. Ensayos realizados al respecto han demostrado que los concretos de alta resistencia pueden alcanzar entre 76 y 105 MPa a la edad de 28 días siempre y cuando se cumpla con las siguientes apreciaciones:

- Los contenidos de cemento estén en el orden de 450 a 550 kg/m³ de cemento.
- La relación de agregado fino/grueso sea aproximadamente de 42/58.
- La relación agua/cemento esté entre 0.22 a 0.27, con contenidos de microsilíce del 10 por ciento.
- Un 2 por ciento de aditivo.

La resistencia promedio que se obtuvo con esas características de las mezclas fue de 64 MPa.

Taiwán: El crecimiento de la economía en este país ha traído como consecuencia que se promuevan importantes proyectos de investigación en el ramo de la construcción, entre los que se destaca el establecer el criterio para producir concretos de alto desempeño utilizando aditivos químicos y minerales, aunque sufren de la carencia de materiales como la arena y la grava.

Corea : A pesar de la importación de la microsilíce para producir concretos de alto desempeño, han logrado construir un edificio comercial - *residencial Samsung Sin*

Dae Bang, en el que se llegó a alcanzar una resistencia a compresión de 70 MPa, combinando la microsilice con la ceniza volante.

Nueva Zelandia: La durabilidad ha sido ampliamente discutida entre investigadores de este país después del fracaso en el empleo de algunos productos cementantes. La falla ha sido atribuida al exceso de microsilice junto con un alto contenido de aditivo superfluidificante.

6.2.2. EUROPA

El concreto de alto desempeño es usado básicamente en la mayoría de las aplicaciones estructurales incluyendo puentes, edificios, túneles, plantas de energía, etc. Algunos ejemplos, tabla 20, donde se puede destacar el uso de este tipo de concreto en Europa son:

- El puente de Normandía en Francia.
- El puente *Great Belt Link* en Dinamarca.
- El Túnel Canal entre Francia e Inglaterra.

Francia: El CAD fue introducido en este país para la construcción de puentes. El uso en edificaciones se inició con el Gran Arco de la Defensa, en la actualidad se plantea que todas las plantas nucleares serán construidas con concretos de alto desempeño, tabla 20.

Actualmente se considera que la mayoría de las edificaciones de gran altura han sido construidas usando este tipo de concreto, así como también los recipientes o contenedores de las plantas de energía nuclear, las plataformas marinas y los túneles. No se puede dejar de destacar en el desarrollo de los concretos de alto desempeño en este país, dos edificaciones que resultan del avance a nivel mundial:

- El puente de Normandía de 857 metros de claro central, que fue construido con concreto de alto desempeño y de microsilice, y que llegó a alcanzar una resistencia de 60 MPa.
- La Biblioteca de Francia, que es una gran construcción de 370,000 m² y que comprende 4 torres altas de 90 m; en su construcción se utilizó una resistencia de 60 MPa para las columnas de soporte de esas torres.

Alemania: Una aplicación particular es el uso de contenedores fabricados con CAD, que se utilizan para almacenar materiales tóxicos; también se emplean barreras resistentes para desechos peligrosos.

Dinamarca: El uso de los CAD se comenzó en la década de los 80's, siendo la construcción del puente *Rya* el primer acontecimiento al respecto. En los siguientes años se produjo el aumento en el uso de la microsilice en la elaboración de concretos para ambientes muy agresivos; esto como consecuencia de la reducida durabilidad de los elementos fabricados con este material sometidos a este tipo de ambiente. Algunos valores se presentan en la tabla 21.

Noruega: Se ha realizado algunos estudios con la finalidad de demostrar que los CAD son sumamente sensibles al agrietamiento, sobre todo durante las primeras 12 horas después de su colocación. Se han desarrollado técnicas experimentales para ser aplicadas contra el agrietamiento sensible y contra el cambio de volumen en la fase de fraguado.

6.2.3. AMERICA Y RESTO DEL MUNDO

Estados Unidos: La aplicación tradicional de los CAD ha sido fundamentalmente para el colado de columnas de edificios de gran altura. Recientemente se han utilizado también este tipo de concretos para la fabricación de vigas en puentes con sección compuesta. La evaluación económica para la construcción de columnas en edificios de varios niveles, se realiza en la actualidad entre otras

formas empleando un programa de computo llamado "*Reinforced Concrete Column Load*" (COLO). Dicho programa analiza, diseña, optimiza y obtiene el costo de las columnas y de las zapatas en el edificio analizado.

En Chicago la industria del premezclado aplicó durante más de 60 años la tecnología y la experiencia de los CAD de baja resistencia, como se conoce este tipo de concreto es utilizado principalmente en la construcción de garajes, banquetas y otros elementos estructurales que no necesitan de tanta resistencia a la compresión.

La primera especificación para la utilización de los CAD y el empleo microsílíce fue hecha para la rehabilitación de la Presa *Kinzua* por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Canadá: En 1980 se construyó una banqueta experimental fabricada combinando al llamado concreto convencional con el CAD; durante el colado se utilizaron 11 mezclas diferentes en cuanto al contenido de cemento, el cual osciló entre los 140 y los 405 kg/m³, así como con un contenido de microsílíce en el rango de entre el 10 y el 40 por ciento del peso del cemento. En este estudio se obtuvieron resultados después de 16 años; los resultados mostraron una alta resistencia a compresión, baja permeabilidad al ión-cloruro y una buena durabilidad al congelamiento y deshielo a lo largo de esos años. Los concretos que contenían humo de sílice mostraron un mejor comportamiento a largo plazo que el concreto normal que fue colocado en una pequeña parte de la banqueta.

México: En los últimos 5 años en México se ha iniciado la construcción de edificaciones importantes utilizando concretos de alto desempeño tales como: Conjunto del Bosque, edificio de departamento de 33 niveles, resistencia a compresión de 450 kg/cm².

La Torre Arcos, edificio de oficinas de concreto arquitectónico blanco, resistencia a compresión de 450 kg/cm².

La Torre *Dataflux*, edificio de oficinas de concreto arquitectónico blanco, 40 niveles, resistencia a compresión de 400 kg/cm².

6.3. DISEÑO ESTRUCTURAL Y LIMITACIONES SEGÚN DIVERSOS CODIGOS INTERNACIONALES

- En Francia son aceptados en todas las estructuras de concreto reforzado y presforzado los concretos con resistencia a compresión de 60 MPa. Para el caso de los concretos que oscilen entre 60 y 80 MPa el permiso es concedido dependiendo de la particularidad de cada caso. Ya por encima de los 80 MPa se requiere de una investigación especial de la aplicación deseada.
- En Alemania el uso de los CAD es muy común hasta los 55 MPa y el límite aceptable llega a ser de hasta los 95 MPa, cualquier otro valor mayor a este valor límite requiere de un estudio especial.
- En Noruega, el límite común aceptado por el Estándar Noruego NS 3473-E es de 107 MPa.
- El código de Dinamarca plantea que el uso de concreto estructural tiene como límite los 50 MPa en el nivel de la característica de la resistencia del concreto.
- En Canadá, el Reglamento Canadiense de Construcción contempla el uso de concretos con resistencias de hasta 85 MPa.
- En general las Normas Europeas comunes revelan que debería establecerse el límite de resistencia a compresión en 105 MPa.

- En Estados Unidos, se asegura que no existe un límite de resistencia establecido por el código de edificaciones, excepto en el caso del diseño para el refuerzo por cortante y de la longitud de desarrollo, en los cuales se recomienda que la resistencia del concreto no debe exceder los 70 MPa.

6.4. NECESIDAD DE FUTURAS INVESTIGACIONES

La creciente demanda de mejorar cada vez más la calidad de los llamados materiales de construcción es una realidad, muestra de ello es el desarrollo que han tenido en estos últimos años los concretos de alto desempeño. Esta creciente demanda que trae consigo la fabricación de estructuras de una mayor complejidad desde el punto de vista arquitectónico, de un menor peso estructural (el uso de CAD permite que se logre durante el proceso de diseño secciones de elementos estructurales menores y por tanto más económicas) y de una mayor funcionalidad, y que en sentido general significa que se logren edificaciones más racionales y estéticas; justifica cada vez más la gran inversión que año tras años se viene realizando en algunos países desarrollados, con la finalidad de investigar en detalles las características de los CAD.

A continuación se presentan un conjunto de aspectos que deben ser desarrollados e investigados cuanto antes tanto en México como en cualquier otro país del mundo, con el fin de lograr que los CAD sean considerados como un concreto de primera línea a nivel mundial:

1. Estudio del desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto a largo plazo cuando se utiliza microsilíce.
2. Tratar de desarrollar métodos de pruebas documentados para la determinación de la fluidez en el concreto.

3. Tratar de desarrollar estudios que permitan evaluar la trabajabilidad del concreto de alto desempeño.
4. Lograr desarrollar métodos de pruebas documentados con el objeto de evaluar el agrietamiento temprano del concreto de alto desempeño.
5. Estudiar, investigar y lograr cuantificar el comportamiento característico del agrietamiento en el concreto de alto desempeño, sobre todo durante el endurecimiento de la mezcla una vez colado el elemento (agrietamiento por contracción plástica).
6. Ensayar el comportamiento del concreto de alto desempeño al ser producidos con varios tipos de aditivos, tanto químicos como minerales; especialmente para ser aplicados en la construcción de contenedores de almacenamiento de desperdicios tóxicos, así como otros fluidos peligrosos.
7. Lograr desarrollar una metodología apropiada para la predicción de la vida útil de las estructuras construidas con concreto de alto desempeño.
8. Estudio y mejora de los métodos de evaluación de la durabilidad en elementos fabricados con concreto de alto desempeño.
9. Investigar el uso de fibras (artificiales o no artificiales) como refuerzo secundario en el concreto de alto desempeño, con el fin de mejorar la ductilidad, la adherencia con las varillas de refuerzo utilizadas, así como de otras propiedades.
10. Estudiar el comportamiento de resistencia al fuego del concreto de alto desempeño, tanto de peso normal, como de peso ligero.

11. Desarrollar conceptos de diseño de estructuras híbridas haciendo uso de los concreto de alto desempeño.
12. Desarrollar un sistema de cálculo y diseño basado en el conocimiento y la experiencia, con el objetivo de facilitar la selección preliminar de los materiales, así como de las proporciones óptimas durante el diseño de las mezclas de concreto de alto desempeño.
13. Desarrollar e implementar un plan experimental eficiente para determinar los parámetros fundamentales que afecten el curado del concreto de alto desempeño.
14. Desarrollar una guía que permita la selección adecuada de los materiales a utilizar en la fabricación del concreto de alto desempeño, así como de los procedimientos necesarios para la reparación de daños y deterioros de elementos construidos con este tipo de material.
15. Desarrollo de un estado del arte del uso del concreto de alto desempeño en edificaciones, carreteras, puentes y estructuras especiales en sentido general.
16. Determinar la relación entre corazones extraídos y cilindros para CAD.
17. Diseñar, desarrollar y verificar nuevos sistemas de construcción para CAD.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los concretos de alto desempeño requieren de altos consumos de cemento *portland*, la utilización de microsilíce en porcentajes comprendidos entre 5 y 10 por ciento del peso del cemento, la incorporación de aditivos superfluidificantes y bajas relaciones agua/cementante.
2. La producción de los concretos de alto desempeño requiere de una cuidadosa selección de los materiales a utilizar, así como un estricto control de calidad de los materiales componentes y del proceso de fabricación de la mezcla en sus diferentes etapas.
3. Desde el punto de vista de la resistencia mecánica los consumos óptimos de microsilíce se encuentran cercanos a 5 por ciento del peso del cemento, en tanto que por durabilidad resulta conveniente incrementar a 10 por ciento del peso del cemento el consumo de microsilíce.
4. De acuerdo con la trabajabilidad deseada el consumo de aditivo superfluidificante de alto rango (tipo F) utilizado en este estudio varió entre 1 y 2 por ciento del peso del cementante.
5. Para los concretos de más altas resistencias mecánicas se requiere el empleo de agregado grueso de 10 mm de tamaño máximo.
6. Para los agregados utilizados en el estudio se encontró que una combinación de 43 por ciento de arena y 57 por ciento de grava resultó satisfactoria desde el punto de vista de trabajabilidad en la mezcla.

7. Las mayores resistencias a compresión se alcanzaron cuando se tuvieron consumos de cementante del orden de 500 kg/m³ de concreto con un porcentaje de microsilíce de 5 por ciento.
8. En los concretos de alto desempeño, sometidos a métodos acelerados de predicción de resistencia, no se logra que la microsilíce reaccione a muy corto plazo por lo que la resistencia a compresión a 24 horas son menores que las correspondientes a 28 días de curado normal. En concretos hechos solo con cemento *portland* estas resistencias son del mismo orden.
9. Para los concretos de alto desempeño estudiados la resistencia a compresión a largo plazo se puede estimar en función de la correspondiente a 28 días con la expresión:

$$(f_c)_t = (5.6)^{t/28} (f'_c)_{28}, \text{ } f_c \text{ y } f'_c \text{ en kg/cm}^2 \text{ y } t \text{ en días}$$

10. Independientemente del nivel de resistencia a tensión que se alcanza con los concretos de alto desempeño, el parámetro que relaciona la resistencia a tensión con la de compresión resulta alto en comparación con el alcanzado en concretos comunes.
11. Las expresiones que relacionan las resistencias a tensión y a compresión resulta ser:

$$\text{Tensión por flexión} \quad f_t = 3 f'_c \quad \text{. en kg/cm}^2$$

$$\text{Tensión indirecta} \quad f_t = 1.8 f'_c \quad \text{. en kg/cm}^2$$

14. La tendencia de aumentar el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión se mantuvo hasta valores de resistencia a compresión del orden de 600 kg/cm^2 , después de la cual el módulo de elasticidad se mantuvo constante.
15. El valor del módulo de elasticidad se puede estimar con la expresión:

$$E_c = 14.500.00 \cdot f'c \text{ , en kg/cm}^2$$

16. La relación de *Poisson* media para los concretos estudiados fue de 0.24.
17. La contracción por secado última para los concretos de alto desempeño estudiados fue del orden de 500×10^{-6} , menor que la correspondiente a los concretos convencionales.
18. El coeficiente de deformación diferida medio resultó ser de 1.9, menor que el correspondiente a los concretos convencionales.
19. Los códigos de edificaciones no ponen límite de resistencia para fines de dimensionamiento, sin embargo, para el diseño de refuerzo por cortante y el cálculo de la longitud de desarrollo se recomienda que el concreto no exceda 700 kg/cm^2 .
20. Aunque el avance en el desarrollo de los concretos de alto desempeño es significativo, hay muchos aspectos de su comportamiento que requieren ser investigados y llevados a la práctica en sus aplicaciones.
21. Se recomienda una mayor integración de las universidades, industrias, profesionales del diseño, gobierno y sociedades técnicas para lograr un intercambio de conocimiento e información sobre la tecnología del concreto de

alto desempeño, así como una mayor preocupación por la durabilidad de las construcciones.

22. Se tiene que realizar una labor de difusión del conocimiento con los especificadores de proyecto, tanto en la construcción como en la rehabilitación de estructuras para el empleo del concreto de alto desempeño.

BIBLIOGRAFIA

I. PUBLICACIONES PERIODICAS CONSULTADAS

BENTZ, D.P., y SHUTZMAN, P.E., "Evolution of porosity and calcium hidroxide in laboratory concretes containing silica fume", *Cement and Concrete Research*, n. 6, Estados Unidos, 1994, págs. 1044-1050.

DEHUI, W. et al., "Computerized mix proportioning for high performance concrete", *Concrete International*, v. 19, n. 9, Estados Unidos, Septiembre de 1997, págs. 42-45.

GOODSPEED, Vanikar et al., "High performance concrete defined for highway structures", *American Concrete Institute*, Febrero de 1996, 145 págs.

KHATRI, R.P., y SIRIVIVATNANON, V., "Effect of different supplementary cementitious material on mechanical properties of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, n. 1, Estados Unidos, 1995, págs. 209-220.

LACHEMI, M. et al., "Long-term performance of silica fume concrete", *Concrete International*, v. 20, n. 1, Estados Unidos, enero 1998, págs. 59-65.

MORENO, Jaime, "High-performance concrete: economic consideration", *Concrete International*, v. 20, n. 3, Estados Unidos, marzo de 1998, págs. 68-70.

ZHOU, F.P. et al., "Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high permormance concrete", *Cement and Concrete Research*, n. 1, Estados Unidos, 1995, págs. 177-186.

II. OBRAS CONSULTADAS

BENTUR, A., *Advances in cementitious materials*, Ceramic Transactions, Estados Unidos, 1991, págs. 523-526.

CARMONA FLORES, Carlos, *Método acelerado para verificar la resistencia mecánica del concreto*, Asesor: M. en I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1997, 256 págs.

High performance concrete, American Concrete Institute, Compilación 32, Estados Unidos, 1995, págs. 29-34.

High-performance construction materials and system, Civil Engineering Research Foundation, Executive Report 93-5011, Abril de 1993.

MENDOZA, Carlos et al., *Concretos fabricados con arenas y gravas calizas disponibles en el DF*, Informe para la Secretaría General de Obras, Departamento del DF, México, 1995, 80 págs.

OZYLDIRIM C., HALSTEAD W., *Resistance to chloride ion penetration of concrete containing fly ash, silica fume or slag*, American Concrete Institute, SP108-3, Noruega, págs. 35-61.

RAMACHANDRAN, V.S., *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, Estados Unidos, 1995, 285 págs.

WOLSIEFER, J.T., CLEAR, K., *Durabilidad del Concreto*, Memoria del seminario internacional sobre tecnología del concreto, Estados Unidos, 1993, págs. 259-281.

ZIA, P., *High performance concrete*, American Concrete Institute, SP-159, Estados Unidos, 1996.

Anexo I

Propuesta de método de prueba para
fabricar, curar aceleradamente, y
ensayar a compresión el concreto en
especímenes de prueba.

Propuesta de Método de Prueba para Fabricar, Curar Aceleradamente, y Ensayar a Compresión el Concreto en Especímenes de Prueba.

1. ALCANCES.

Este método establece un procedimiento para fabricar, curar y ensayar a compresión especímenes de concreto almacenados bajo condiciones tendientes a acelerar el desarrollo de resistencia; el método puede ser denominado "Método de curado adiabático con aditivo acelerante".

2. SUMARIO.

Los especímenes de concreto desarrollarán una porción significativa de su resistencia potencial a través de dos medios: 1) el empleo de un aditivo acelerante de la hidratación del cemento (cloruro de calcio) y 2) la elevación de temperatura resultado de una adecuada retención del calor liberado por los especímenes de prueba. Para ello se utiliza un recipiente construido de aislante térmico.

3. IMPORTANCIA Y USO.

3.1 El método puede ser utilizado con dos fines principales: 1) obtener información anticipada que permita evaluar la dispersión con que se está produciendo el concreto y 2) utilizar los resultados de resistencia acelerada para predecir la resistencia del concreto a la edad de proyecto, determinando para ello, a través de mezclas experimentales, la correlación existente entre la resistencia acelerada y la resistencia en curado normal a la edad de proyecto.

3.2 El uso de las predicciones será limitado para concretos elaborados con el mismo tipo de materiales con los que se estableció la correlación.

4. EQUIPO REQUERIDO.

4.1 Herramientas y/o equipo pequeño.

Las herramientas y/o equipo pequeño para la fabricación de los especímenes, así como para la determinación de las propiedades del concreto fresco, serán conforme se establece en la Práctica ASTM C 31. Adicionalmente se requerirá el siguiente equipo:

- a) Una balanza de laboratorio con una resolución de 0.1 gramo.
- b) Un recipiente cilíndrico con dimensiones de 252 mm (10 pulg) de diámetro por 252 mm (10 pulg) de altura.
- c) Una charola de dimensiones adecuadas para remezclar un volumen de 12.5 litros de concreto.
- d) Bolsas de polietileno de uso rudo.
- e) Guantes de hule.
- f) Termómetro de máxima y mínima.

4.2 Moldes.

El método propone la fabricación de tres especímenes cúbicos compañeros de 150 mm por lado. De acuerdo a lo anterior podrán usarse moldes individuales o un molde triple metálico reusable provisto de tapa (en las figs 7 y 8 se muestra el diseño de un molde triple, cuyo funcionamiento ha demostrado ser exitoso).

4.3 Recipiente o Contenedor.

4.3.1 El recipiente será construido de un material aislante térmico y deberá ser capaz de alojar estrechamente en su interior a los moldes individuales o al molde triple. Además, su diseño y construcción deberán garantizar un perfecto sellado durante el desarrollo de la prueba.

4.3.2 El recipiente térmico debe reunir una serie de requerimientos técnicos, a fin de garantizar su adecuado funcionamiento. Para ello se establece el cumplimiento de las siguientes pruebas, conforme se especifica para el método C de la Norma ASTM C 684:

- a) Prueba de retención de calor
- b) Prueba de hermeticidad entre las juntas y
- c) Prueba de estabilidad y/o firmeza.

Para el cumplimiento de estas pruebas, el material aislante debe apegarse en lo posible a las especificaciones técnicas mostradas en las tablas 3 y 4. En las figs 14 y 15 se presenta el diseño de un recipiente térmico que ha mostrado tener un funcionamiento adecuado.

5. PROCEDIMIENTO.

El muestreo del concreto, así como la determinación de sus propiedades en estado fresco se realizan de la manera usual de acuerdo con las prácticas ASTM: C 172 y C 31 respectivamente.

5.1 Elaboración de los especímenes

5.1.1 La muestra de concreto para la fabricación de los tres especímenes cúbicos compañeros, se obtiene mediante el llenado del recipiente de 12.5 litros de capacidad. El llenado se efectúa compactando el concreto en tres capas y 25 penetraciones de barra estándar por cada capa.

5.1.2 A partir del conocimiento previo del consumo unitario de cemento en la mezcla de concreto muestreada (en kg/m^3) se calcula el contenido de cemento (en kg) en la porción de 12.5 litros de concreto, dividiéndolo entre 80.

5.1.3 La cantidad de cloruro de calcio anhidro (en polvo) que se debe añadir a la muestra de 12.5 litros de concreto, será el equivalente a 1.8 por ciento del peso del cemento contenido en dicha muestra.

5.1.4 Se vacía la muestra de 12.5 litros de concreto en la charola de dimensiones adecuadas, se le añade el cloruro de calcio previamente calculado y se remezcla con las manos protegidas con guantes de hule durante 2 minutos.

5.1.5 Con la muestra de 12.5 litros de concreto perfectamente homogeneizada se cueban los tres especímenes cúbicos de prueba, ya sea en los moldes individuales o en el molde triple. Finalmente se enrasan perfectamente y se les coloca su tapa.

5.2 Período de curado acelerado.

5.2.1 Cada molde individual o el molde triple (con los especímenes de prueba) se coloca dentro de una bolsa de polietileno, esta debe ser amarrada teniendo la precaución de dejar la menor cantidad de aire atrapado en su interior. Una vez previsto lo anterior, el molde (o moldes) se introduce en el recipiente de curado autógeno, donde permanecerá perfectamente cerrado durante un tiempo de 23 hr 50 min \pm 10 min.

5.2.2 El recipiente debe protegerse del sol y mantenerse a una temperatura entre 15 y 27°C.

5.2.3 Dentro del recipiente debe colocarse un termómetro de máxima y mínima, para registrar

estas temperaturas durante el período de curado acelerado.

5.3 Ensayo de los especímenes.

5.3.1 Después del período de curado, se extraen los moldes individuales o el molde triple del recipiente de curado y se descimbran los especímenes. Estos deben ser ensayados a compresión inmediatamente (24 hr \pm 10 min) sin necesidad de preparar las superficies de carga, con la sola precaución de aplicar la carga en las superficies que quedaron en contacto con las paredes laterales del molde, a fin de evitar utilizar la superficie de enrasamiento.

5.4 Uso de los resultados.

Para el uso de los resultados de resistencia acelerada es pertinente atender los criterios establecidos por el comité ACI 214 en su reporte 214.1R.

Nota.- Para poder agrupar y analizar un conjunto de resultados de resistencia acelerada, el rango de la temperatura inicial del concreto en todas las pruebas del conjunto no debe exceder a 4°C.

Anexo II

Mediciones de la profundidad de
carbonatación en el concreto
endurecido.

MEDICIONES DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO ENDURECIDO

1.- OBJETIVO Y ALCANCE

El método de prueba consiste en determinar la profundidad de la capa carbonatada en la superficie del concreto endurecido por medio de un indicador. Este método puede ser llevado a cabo utilizando testigos hechos en el laboratorio o especímenes tomados de estructuras (especímenes de sitio). En el caso de pruebas usando especímenes de sitio los requerimientos para mediciones precisas son menos severas que para especímenes de laboratorio. A menos que se indique otra cosa en las siguientes páginas se debe interpretar que las sugerencias son dadas para ensayos de laboratorio.

2.- DEFINICIÓN

El dióxido de carbono el cual penetra en la superficie del concreto puede reaccionar con los componentes alcalinos en la pasta de cemento, principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este proceso (carbonatación) conduce a reducir el valor del pH de la solución de poro aproximadamente a 9. La profundidad de la capa superficial carbonatada es llamada la profundidad de carbonatación “ d_k ”

La reducción del valor de pH puede ser visible por el cambio de color del indicador apropiado.

3.- MATERIALES DE ENSAYE

Una solución de 1 % de fenolftaleína en 70 % de alcohol etílico, es apropiada para determinar la profundidad de carbonatación.

La fenolftaleína se torna rojo en contacto con materiales con valores de pH por encima de 9.2 y permanece incoloro en valores bajos de pH.

Los agentes indicadores alternativos los cuales cambian de color en la región ligeramente alcalina son, por ejemplo, timolftaleína y alizarin amarillo R.

4.- PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1 Especímenes; tipo de fabricación, curado y almacenamiento

Para cada dato de prueba, son apropiados prismas de concreto con una sección transversal de al menos 100 x 100 mm que pueden ser partidos en longitudes de aproximadamente 50 mm.

En pruebas con mortero se recomiendan prismas de 40 x 40 x 160 mm del cual se obtiene una rebanada de aproximadamente 20 mm para cada dato de prueba.

Durante la preparación del espécimen, es importante evitar algún defecto no deseado en la superficie del concreto el cual podría perjudicar la medición. Por ejemplo, se deben evitar ralladuras, desprendimientos de material.

Normalmente se deben usar los métodos para fabricación y curado de muestras (recomendaciones RILEM CPC-3).

Se debe definir y seguir exactamente el tipo de curado seleccionado durante el ensayo (duración de almacenamiento de agua, grado de secado por almacenamiento en aire, endurecimiento acelerado, etc).

Se debe definir exactamente las condiciones climáticas de almacenamiento (humedad relativa, cantidad de concentración de CO₂, etc). Normalmente el almacenamiento debe estar bajo la condición de aproximadamente 0.03 % de concentración de CO₂, una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 65 %.

Aparte del almacenamiento normal de laboratorio es conveniente el almacenamiento al aire libre, almacenamiento con o sin cubierta.

Generalmente no se recomienda pruebas cortas usando más altas concentraciones de CO₂. El aire debería ser capaz de alcanzar la superficie de ensayo libre en todos los momentos. Por esta razón es necesario el espacio libre al menos 20 mm alrededor de los especímenes.

4.2 Ensayo

Se recomiendan las siguientes edades de prueba:

7; 28; 90; 180 días; 1; 1.5; 2; 3 años, después de la primera exposición de CO₂.

En el caso de investigaciones más especializadas, pueden ser necesarios datos adicionales.

Para cada prueba se rompe una tajada para medir la profundidad de carbonatación en especímenes de laboratorio. La rebanada debería ser suficientemente gruesa para evitar algún cambio de la penetración del dióxido de carbono del extremo de la superficie que afecte las mediciones observadas desde la cara superficial.

La profundidad de penetración es medida en la superficie recientemente rota. Los cortes de sierra no son siempre apropiados. Inmediatamente después de la rotura se limpia el polvo y las partículas sueltas y luego se rocía con la solución indicadora.

Si aparece una débil o ninguna coloración en la superficie tratada, es conveniente repetir la prueba de rociado después que la superficie haya secado.

Se debe evitar la formación de canal de escurrimiento en la superficie de prueba.

Para estabilizar la coloración temporalmente, se puede rociar una resina después del secado.

Se mide la profundidad de penetración 24 hrs. después del rociado de la solución indicadora. La precisión de la medición debe ser al menos 0.2 mm en casos donde la profundidad de penetración es más de 3mm. La profundidad de penetración menor que 0.5 mm no son diferenciadas.

Si el frente de carbonatación no sigue una línea recta paralela a la superficie (fig.1), la profundidad de carbonatación se debe determinar de la siguiente manera:

En el caso que el frente de carbonatación sea como en la figura 2, se debe registrar un promedio gráfico y el máximo. Si el frente de carbonatación es paralela a la superficie y tiene áreas carbonatadas aisladas más profundas como en la figura 3, entonces la profundidad máxima de carbonatación debe ser la profundidad normal. En este caso no se calcula el promedio.

Se debe ignorar las grandes profundidades de carbonatación en las esquinas de los testigos de laboratorio, donde el dióxido de carbono ha penetrado desde dos lados al mismo tiempo.

En el caso de los concretos con tamaño máximo de agregado grande, se debe tener cuidado de medir sólo en la pasta de cemento endurecida.

4.3 Resultado de ensaye y reporte de prueba

Para cada espécimen se reporta la profundidad promedio de la carbonatación.

La profundidad promedio de carbonatación para especímenes de laboratorio incluye valores de todos los lados. Si la profundidad de carbonatación sobre una superficie aplanada varía considerablemente con las otras superficies, ésta no debe registrarse. Las áreas de transición, las cuales han perdido su coloración después de 24 horas son también juzgadas como carbonatación.

Este reporte de ensaye debe incluir:

(a) Datos generales.

- Mezcla de concreto
- Curado (tipo, duración)
- Condiciones climáticas (humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, orientación durante el almacenamiento al aire libre, concentración de CO₂).

(b) Datos de prueba

- Edad del concreto
- Forma y tamaño de la superficie de concreto ensayada
- Indicador
- Aparato de medición
- Profundidad promedio de carbonatación d_k de al menos 0.5 mm con detalles de la carbonatación de acuerdo a:
 - Figura 1, regular
 - Figura 2, irregular d_k y $d_{k\ max}$
 - Figura 3, regular d_k y $d_{k\ max}$.
- Donde sea relevante registrar la profundidad de carbonatación en la superficie aplanada.
- Precisión de la medición y/o tolerancia.

5. ENSAYES EN ESTRUCTURAS

5.1 Especímenes

La determinación de la profundidad de carbonatación es más conveniente llevarla a cabo usando corazones tomados de estructuras. El diámetro de cada corazón debe ser de al menos 50 mm. En ensayos para estimación aproximada de profundidad promedio de carbonatación en especímenes de orientación diferentes pueden también ser rotos con un cincel desde la superficie, y medir la profundidad de carbonatación sobre la superficie de fractura del espécimen.

5.2 Ensaye

La determinación de la profundidad de carbonatación en corazones debe ser llevado a cabo inmediatamente después de la perforación. Si es necesario almacenar por un mayor tiempo por razones especiales, los especímenes deben ser almacenados en recipientes libres de CO_2 hasta que puedan ser medidos.

Es apropiado medir la profundidad de carbonatación en superficies extraídas de muestras en ángulo recto a la superficie del miembro estructural. Las mediciones llevadas a cabo sobre superficie externa de los corazones son menos apropiados.

5.3. Resultados y reporte de ensaye

La profundidad de carbonatación debe ser especificada con una precisión de al menos un 1mm.

Los reportes de ensaye deben contener además de los puntos mencionados en 4.3, los siguientes detalles:

- Identificación de la estructura
- Localización de perforaciones y la orientación de la superficie expuesta a CO₂ en la construcción (vertical u horizontal).
- Fecha de perforación y de ensaye.
- Evaluación general del concreto (estructura del concreto, agregados, poros).

6. REFERENCIAS

RILEM DRAFT RECOMMENDATION CPC-18, NOV-DEC 1984 ; 102

Figura 1

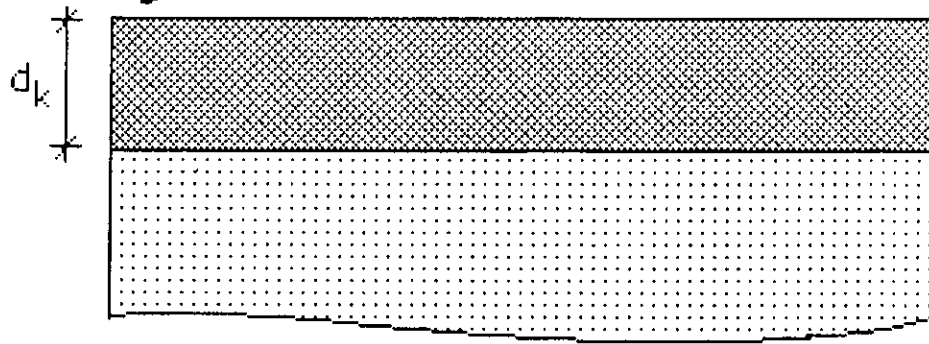


Figura 2

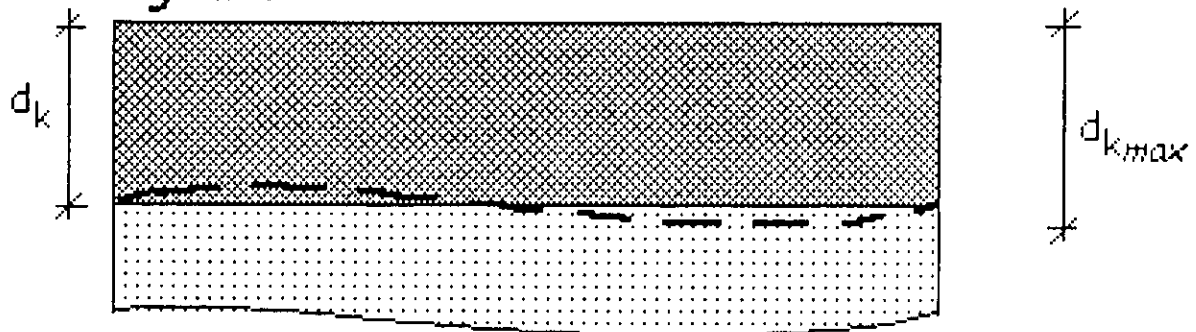
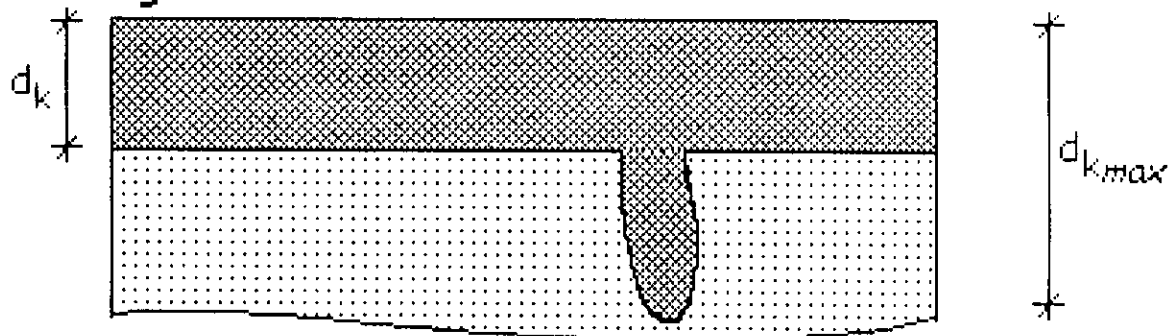


Figura 3



Apéndice A

Tablas

**TABLA 1 : RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA SIN LAVAR
PRIMERA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA			
Descripción: Arena andesítica (sin lavar) Modificación: ninguna Fecha de recibo 16/03/97			
CONCEPTOS		PRUEBA 1	
Análisis granulométrico:		Peso	%
Retenido malla #4			Acum.
Pasa por malla #4			
Suma			
Retenido malla #4			
" "	8	131.70	24.20
" "	16	100.90	42.70
" "	30	82.80	57.90
" "	50	77.30	72.10
" "	100	50.40	81.30
Pasa malla # 100		102.10	18.70
Suma		545.20	100.00
Módulo de finura			2.78
Pasa malla #200 (lavado)		Ps	PL
(Por ciento)		535.90	450.50
			PxL
			15.90

**TABLA 2 : RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA 1 LAVADA
PRIMERA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA			
Descripción: Arena andesítica (1 lavada)			
Modificación: ninguna			
Fecha de recibo: 18/03/97			
CONCEPTOS	PRUEBA 1		
Análisis granulométrico:	Peso	%	Acum.
Retenido malla #4			
Pasa por malla #4			
Suma			
Retenido malla #4			
" " 8	149.20	24.60	21.60
" " 16	128.00	21.10	45.70
" " 30	107.90	17.80	63.50
" " 50	96.30	15.90	79.40
" " 100	62.30	10.20	89.80
Pasa malla # 100	63.20	10.40	
Suma	606.90	100.00	100.00
Módulo de finura			3.00
Pasa malla #200 (lavado)	Ps	PL	PxL
(Por ciento)	549.30	525.00	4.42

**TABLA 3: RESULTADOS DE PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA 2 LAVADAS
PRIMERA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA			
Descripción: Arena andesítica (2 lavadas)			
Modificación: ninguna			
Fecha de recibo: 18/03/97			
CONCEPTOS	PRUEBA 1		
Análisis granulométrico:	Peso	%	Acum.
Retenido malla # 4			
Pasa por malla # 4			
Suma			
Retenido malla # 4			
" " 8	151.10	25.90	25.90
" " 16	131.20	22.40	48.30
" " 30	107.30	18.30	66.60
" " 50	92.40	15.80	82.40
" " 100	57.40	9.80	92.20
Pasa por malla # 100	45.50	7.80	
Suma	584.90	100.00	100.00
Módulo de finura			3.15

**TABLA 4: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA TRES LAVADAS
PRIMERA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA								
PRUEBAS FISICAS DE ARENA								
Descripción:		Arena andesítica (3 lavadas)						
Modificación:		ninguna						
Fecha de recibo:		19/03/97						
CONCEPTOS	PRUEBA 1			PRUEBA 2			PROMEDIO	
Análisis granulométrico:	Peso	%	Acum.	Peso	%	Acum.	%	Acum.
Retenido malla #4	59.4							
Pasa por malla #4	308.5							
Suma	367.9							
Retenido malla #4								
" " 8	152.17	26.47	26.47	138.34	26.02	26.02	26.25	26.25
" " 16	119.99	20.87	47.34	110.62	20.80	46.82	20.84	47.08
" " 30	105.91	18.42		98.72	18.57	65.39	18.50	65.58
" " 50	91.34	15.89	65.76	85.61	16.10	81.49	16.00	81.57
" " 100	61.49	10.69	81.65	57.49	10.81	92.29	10.75	92.32
Pasa malla # 100	44.05	7.66	92.34	40.92	7.71		7.69	
Suma	574.95	100.00	100.00	531.70	100.00	100.00	100.00	100.00
Módulo de finura			3.16			3.13		3.15
Densidad:	Pss	V	D	Pss	V	D	D	
	500.00	205.00	244.00	500.00	204.00	2.45	2.45	
Absorción	Ps	Pss-Ps	Abs.	Ps	Pss-Ps	Abs.	Abs.	
(Por ciento)	478.70	500.00	4.45	478.20	500.00	4.56	4.50	
Pasa malla #200 (lavado)	Ps	P _L	P _{xL}	Ps	P _L	P _{xL}	P x L	
(Por ciento)	341.40	333.10	2.43	343.80	336.30	2.18	2.31	
P.V. seco y suelto	P	V	P.V.	P	V	P.V.	P.V.	
(kg/m ³):	9.96	7.07	1409.00	10.01	7.07	1416.00	1412.42	
P.V. seco y varillado	P	V	P.V.	P	V	P.V.	P.V.	
(kg/m ³):	10.78	7.07	1525.00	10.74	7.07	1519.00	1522.00	

**TABLA 5 : RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA MODIFICADA TRES LAVADAS
PRIMERA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA								
PRUEBAS FISICAS DE ARENA								
Descripción:		Arena andesitica modificada (3 lavadas)						
Modificación:		# 8 (-10%), # 16 (- 5%)						
Fecha de recibo:		20/03/97						
CONCEPTOS	PRUEBA 1			PRUEBA 2			PROMEDIO	
Análisis granulométrico:	Peso	%	Acum.	Peso	%	Acum.	%	Acum.
Retenido malla #4								
Pasa por malla #4								
Suma								
Retenido malla #4								
" " 8	110.70	20.14	20.14	104.00	19.76	19.76	19.95	19.95
" " 16	114.40	20.81	40.95	103.10	19.59	39.35	20.20	40.15
" " 30	114.90	20.90	61.85	111.10	21.10	60.45	21.00	61.15
" " 50	101.10	18.39	80.24	100.90	19.17	79.62	18.78	79.93
" " 100	62.00	11.28	91.52	61.40	11.67	91.29	11.48	91.41
Pasa malla # 100	46.60	8.48		45.80	8.70		8.59	
Suma	549.70	100.00	100.00	526.30	99.99	100.00	100.00	100.00
Módulo de finura			2.95			2.90		2.92
Densidad:	Pss	V	D	Pss	V	D	D	
	500.00	203.00	2.46	500.00	202.00	2.48	2.47	
Absorción	Ps	Pss-Ps	Abs.	Ps	Pss-Ps	Abs.	Abs.	
(Por ciento)	482.30	500.00	3.67	481.50	500.00	3.84	3.76	
Pasa malla #200 (lavado)	Ps	P _L	PxL	Ps	P _L	PxL	P x L	
(Por ciento)	356.90	349.10	2.18	354.00	345.80	2.32	2.25	
P.V. seco y suelto	P	V	P.V.	P	V	P.V.	P.V.	
(kg/m ³):	10.11	7.07	1430.00	10.07	7.07	1425.00	1427.50	
P.V. seco y varillado	P	V	P.V.	P	V	P.V.	P.V.	
(kg/m ³):	10.82	7.07	1531.00	10.85	7.07	1535.00	1533.00	

**TABLA 6 : RESULTADO DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA 3 LAVADAS
SEGUNDA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA			
Descripción Arena andesítica (3 lavadas)			
Modificación: ninguna			
Fecha de recibo: 22/05/97			
CONCEPTOS		PRUEBA 1	
1) Análisis granulométrico:		Peso	%
Retenido malla #4			Acum.
Pasa por malla #4			
Suma			
Retenido malla #4			
" " 8		183.90	30.90
" " 16		140.00	54.40
" " 30		105.30	72.10
" " 50		86.20	86.60
" " 100		48.20	94.70
Pasa malla # 100		31.90	5.30
Suma		595.50	100.00
Módulo de finura			3.39

**TABLA 7 : RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
ARENA ANDESITICA MODIFICADA
SEGUNDA TANDA**

INSTITUTO DE INGENIERIA			
Descripción: Arena modificada (3 lavadas)			
Modificación: # 8 (-15%), # 16 (- 10%)			
Fecha de recibo: 26/05/97			
CONCEPTOS	PRUEBA 1		
Análisis granulométrico:	Peso	%	Acum.
Retenido malla #4			
Pasa por malla #4			
Suma			
Retenido malla #4			
" " 8	113.70	18.80	18.80
" " 16	101.10	16.70	35.50
" " 30	144.70	23.90	59.40
" " 50	126.20	20.90	80.30
" " 100	72.10	11.90	92.20
Pasa malla # 100	46.40	7.80	
Suma	604.20	100.00	100.00
Módulo de finura			2.86

**TABLA 8 : RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GRANULOMETRICAS
GRAVA CALIZA**

INSTITUTO DE INGENIERIA								
PRUEBAS FISICAS DE GRAVA								
Descripción:		GRAVA CALIZA 3/8' (9.5 mm.)						
Modificación:		Ninguna						
Fecha de recibo:		31/03/97						
CONCEPTOS	PRUEBA 1			PRUEBA 2			PROMEDIO	
	Peso	%	Acum.	Peso	%	Acum.	%	Acum.
1) Análisis granulométrico:								
Retenido malla #4	40.88	97.98						
Pasa por malla #4	0.84	2.02						
Suma	41.72	100.00						
Retenido malla 152.4 mm.								
" " 76.2 "								
" " 38.1 "								
" " 19.1 "								
" " 9.5 "	1.05	2.52						
" " # 4	39.84	95.46						
" " # 8	0.84	2.02						
Suma	41.73	100.00						
2) Densidad:	Pss	V	D	Pss	V	D	D	
Grava 3/8' (9.5 mm.)	1372.00	518.00	2.65	1312.00	490.00	2.68	2.67	
3) Absorción (%)	Ps	Pss-Ps	Abs.	Ps	Pss-Ps	Abs.	Abs.	
Grava 3/8' (9.5 mm.)	1357.00	15.00	1.09	1300.00	12.00	0.90	1.00	
4) P.V. seco y suelto (kg/m ³)	P	V	P.V.	P	V	P.V.	P.V.	
Grava 3/8' (9.5 mm.)	10.73	7.07	1517.00	10.66	7.07	1508.00	1512.50	

**TABLA 9: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO PH Y MICROSILICE**

MEZCLA	1	2	3	4	5	6	7	8
Cemento	484.00	502.00	502.00	466.00	513.00	514.00	488.00	508.00
Microsilíce	0.00	0.00	25.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cementante	484.00	502.00	527.00	491.00	513.00	514.00	488.00	508.00
Arena	711.00	714.00	709.00	688.00	721.00	723.00	687.00	715.00
Grava	939.00	945.00	937.00	907.00	953.00	956.00	908.00	944.00
Agua	182.00	171.00	176.00	193.00	178.00	172.00	172.00	176.00
Polyheed (%)	0.59	0.59	0.58	0.59	0.25	0.61	0.98	0.61
Polyheed (kg/m ³)	2.86	2.96	3.06	2.90	1.28	3.14	4.78	3.10
RELACIONES								
a/c	0.38	0.34	0.33	0.39	0.35	0.33	0.35	0.35
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO								
Revenimiento								
sin aditivo	4.3	-	-	3.5	1.5	0.3	1.4	1.0
con aditivo	16.8	7.5	4.4	13.5	3.0	4.5	24.0	9.0
aire (%)	3.8	3.2	3.0	3.7	2.6	2.8	6.7	2.7
P.V.f.	2319.0	2333.0	2326.0	2271.0	2370.0	2364.0	2253.0	2341.0
Temperaturas								
mezcla	21.0	20.0	21.0	20.0	22.0	22.0	21.5	21.0
molde mín.	33.0	21.0	24.0	22.0	24.0	24.0	24.0	22.0
molde máx.	41.5	39.0	46.0	43.0	42.0	45.0	45.0	42.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO								
P.V.e.	2339	2331	2338	2290	2376	2380	2283	2362
PVe/PVf	1.01	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
f'c cubos	461.3	517.3	552.4	495.6	552.9	634.2	441.3	598.7
	527.5	618.2	585.3	498.2	581.8	583.6	505.8	574.2
	559.5	496.9	572.9	481.3	521.8	609.3	489.8	627.6
CV cubos (%)	9.70	11.94	2.91	1.85	5.43	4.15	7.01	4.45
f'c 48 horas	585	618	687	598	0.00	0.00	0.00	0.00
f'c cilindros	526.8	513.8	570.9	521.3	504.3	636.0	574.2	623.3
	520.8	598.5	534.0	551.1	511.4	636.0	574.8	615.6
	-	498.7	550.0	523.5	524.6	625.5	580.3	607.3
CV cilindros (%)	0.81	10.02	3.35	3.12	2.01	0.96	0.58	1.30
f'c 24h/f'c 28 d	0.99	1.01	1.03	0.92	1.08	0.96	0.83	0.98

TABLA 10: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO RH

MEZCLA	9	10	11	12	13	14
Cemento	518.00	524.00	524.00	524.00	508.00	505.00
Microsilice	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cementante	518.00	524.00	524.00	524.00	508.00	505.00
Arena	728.00	737.00	737.00	737.00	762.00	757.00
Grava	962.00	975.00	975.00	975.00	1006.00	1000.00
Agua	180.00	159.00	159.00	143.00	140.00	141.00
Rheobuild (%)	0.84	0.84	1.32	1.32	1.92	2.25
Rheobuild (kg/m ³)	4.35	4.40	6.92	6.92	9.75	11.36
RELACIONES						
a/c	0.35	0.30	0.30	0.27	0.28	0.28
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO						
Revenimiento						
sin aditivo	0.7	-	-	-	-	-
con aditivo	24.8	8.3	24.5	5.0	18.8	12.0
aire (%)	1.5	2.4	1.5	2.3	1.5	1.0
P.V.f.	2388.0	2398.0	2411.0	2391.0	2403.0	2412.0
Temperaturas						
mezcla	21.0	21.0	21.0	21.5	21.0	21.5
molde mín.	24.0	22.0	23.5	21.0	25.0	23.0
molde máx.	42.0	38.0	42.0	39.5	44.0	44.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO						
P.V.e.	2375.00	2398.00	2431.00	2414.00	2419.00	2418.00
PVe/PVf	0.99	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00
f'c cubos	556.90	668.90	683.10	572.40	739.60	673.30
	564.40	564.90	650.20	393.30	645.30	500.00
	607.60	547.10	672.90	636.90	690.70	713.30
f'c cilindros	576	594	669	594	692	629
CV cubos (%)	4.75	11.08	2.52	23.63	6.82	18.03
f'c cilindros	683.90	718.60	599.60	599.00	622.20	588.50
	693.30	0.00	604.60	607.30	634.30	618.90
	642.00	697.70	0.00	596.80	599.60	588.60
CV cilindros (%)	4.06	2.09	0.59	0.92	2.85	2.93
f'c 24h/f'c 28 d	0.86	0.84	1.11	0.89	1.12	1.05

**TABLA 11: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO RH Y MICROSILICE**

MEZCLA	15	16	17	18	19	20	21
Cemento	481.00	481.00	485.00	482.00	478.00	476.00	478.00
Microsilice	25.00	25.00	26.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Cementante	506.00	506.00	511.00	508.00	503.00	502.00	503.00
Arena	710.00	715.00	722.00	729.00	734.00	743.00	755.00
Grava	937.00	945.00	954.00	961.00	968.00	978.00	981.00
Agua	182.00	177.00	179.00	168.00	156.00	145.00	146.00
% Rheobuild	0.84	0.84	1.32	1.32	1.32	1.32	1.92
Rheobuild (kg/m ³)	4.25	4.25	6.75	6.71	6.64	6.63	9.66
RELACIONES							
a/c	0.36	0.35	0.35	0.33	0.31	0.29	0.29
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO							
Revenimiento							
sin aditivo	-	-	-	-	-	-	-
con aditivo	15.9	11.7	22.0	20.0	17.0	4.7	9.5
aire (%)	2.0	2.2	1.2	2.5	2.5	2.5	1.4
P.V.f.	2340.0	2347.0	2370.0	2365.0	2364.0	2371.0	2384.0
Temperaturas							
mezcla	22.0	21.0	21.5	21.0	21.0	21.5	21.0
molde mín.	22.0	21.0	22.0	22.0	21.5	22.0	23.0
molde máx.	40.0	42.0	39.5	42.0	40.5	41.0	39.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO							
P.V.e.	2356	2354	2335	2371	2371	2376	2406
PVe/PVf	1.01	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01
f'c cubos	450.20 516.90 468.40	560.40 500.00 545.30	494.20 508.90 496.40	532.40 461.30 550.70	568.00 535.10 526.70	563.60 465.80 582.20	541.30 504.00 462.70
f'c 24 horas	479	535	500	515	543	537	503
CV cubos (%)	7.21	5.87	1.59	9.17	4.02	11.64	7.82
f'c cilindros	601.80 600.10 627.70	685.60 687.20 699.90	0.00 692.70 685.60	688.90 661.90 0.00	764.90 764.40 754.20	763.80 750.60 780.90	746.70 755.50 744.50
f'c 28 d	610	691	689	675	761	765	749
CV cilindros (%)	2.54	1.13	0.73	2.83	0.79	1.99	0.78
f'c 24h/f'c 28 d	0.78	0.77	0.73	0.76	0.71	0.70	0.67

**TABLA 12: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO RH**

MEZCLA	23	24	25	26	27	28
Cemento	552.00	550.00	545.00	552.00	547.00	545.00
Microsilice	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cementante	552.00	550.00	545.00	552.00	547.00	545.00
Arena	696.00	713.00	717.00	715.00	719.00	717.00
Grava	920.00	939.00	948.00	941.00	951.00	948.00
Agua	193.00	171.00	160.00	172.00	160.00	160.00
Rheobuild (%)	0.84	0.84	0.84	1.32	1.32	1.92
Rheobuild (kg/m ³)	4.64	4.62	4.58	7.29	7.22	10.46
RELACIONES						
a/c	0.35	0.31	0.29	0.31	0.29	0.29
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO						
Revenimiento						
sin aditivo	-	-	-	-	-	-
con aditivo	25.5	18.0	11.8	Fluida	23.5	23.0
aire (%)	0.9	2.0	2.3	0.8	1.5	1.0
P.V.f.	2364.0	2378.0	2376.0	2383.0	2386.0	2382.0
Temperaturas						
mezcla	21.5	21.0	22.0	22.0	22.0	22.0
molde mín.	22.0	23.0	23.5	22.5	22.0	24.0
molde máx.	44.5	44.5	43.5	45.5	42.0	45.5
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO						
P.V.e.	2364.00	2389.00	2379.00	2407.00	2413.00	2423.00
PVe/PVf	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02
f _c cubos	503.60	558.20	528.40	577.80	556.40	535.60
	527.10	461.30	525.30	554.70	517.80	549.80
	499.10	510.70	513.80	606.20	551.10	639.10
f _c cilindros	655	572	599	621	653	617
CV cubos (%)	2.95	9.5	1.47	4.45	3.86	9.76
f _c cilindros	0.00	703.20	693.80	620.00	660.20	627.10
	670.10	743.40	709.30	624.40	645.30	607.30
	646.40	725.20	692.70	617.20	0.00	0.00
CV cilindros (%)	2.55	1.78	1.33	0.58	1.61	2.27
f _c 24h/f _c 28 d	0.77	0.70	0.75	0.93	0.83	0.93

TABLA 13: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE SIN ADITIVO

MEZCLA	22	29	30	31	32	33	43
Cemento	547.00	555.00	550.00	548.00	555.00	553.00	604.00
Cementante	547.00	555.00	550.00	548.00	555.00	553.00	604.00
Arena	690.00	678.00	672.00	648.00	678.00	676.00	635.00
Grava	911.00	896.00	887.00	855.00	896.00	893.00	837.00
Agua	191.00	202.00	200.00	219.00	202.00	201.00	217.00
RELACIONES							
a/c	0.35	0.36	0.36	0.40	0.36	0.36	0.36
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO							
Revenimiento							
sin aditivo	5.8	8.5	1.5	7.5	7.0	8.5	8.0
aire (%)	2.2	2.3	2.2	2.0	2.2	2.0	2.1
P.V.f.	2340.0	2330.0	2313.0	2268.0	2325.0	2320.0	2294.0
Temperaturas							
mezcla	21.0	21.0	21.0	22.0	22.0	22.0	21.5
molde mín.	20.0	21.0	24.0	22.0	24.5	22.0	22.0
molde máx.	46.5	44.5	48.0	43.0	49.0	43.0	42.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO							
P.V.e.	2344.00	2330.00	2307.00	2294.00	2300.00	2328.00	2298.00
PVe/PVf	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00
f'c cubos	572.00	521.30	484.00	358.20	605.3	517.8	378.2
	526.20	546.70	410.70	384.40	600.4	530.7	382.2
	525.80	497.80	437.30	367.60	604.0	574.7	376.9
f'c 28 días	541	522	444	370	603	541	379
CV cubos (%)	4.91	4.69	8.36	3.59	0.42	5.51	0.73
f'c cilindros	610.10	590.70	485.50	450.20	597.8	523.8	493.9
	589.10	584.20	462.40	446.90	538.5	513.6	491.6
	594.60	620.00	477.80	440.30	589.6	526.8	473.4
f'c 28 días	598	598	475	446	575	521	486
CV cilindros (%)	1.82	3.19	2.47	1.13	5.59	1.33	2.31
f'c 24h/f'c 28 d	0.91	0.87	0.93	0.83	1.05	1.04	0.78

**TABLA 14: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE RH Y MICROSILICE**

Mezcla	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Cemento	492.00	500.00	494.00	497.00	497.00	494.00	520.00	517.00	517.00
Microsilíce	49.00	50.00	49.00	50.00	50.00	49.00	78.00	78.00	78.00
Cementante	542.00	550.00	543.00	547.00	547.00	543.00	598.00	595.00	595.00
Arena	662.00	672.00	686.00	695.00	707.00	712.00	636.00	652.00	671.00
Grava	874.00	887.00	887.00	919.00	932.00	942.00	837.00	858.00	884.00
Agua	197.00	200.00	178.00	174.00	164.00	153.00	209.00	190.00	172.00
Rheobuild (%)	0.84	1.32	1.32	1.92	1.92	1.92	0.84	1.32	1.92
Rheobuild (kg/m ³)	4.55	7.26	7.17	10.50	10.50	10.43	5.02	7.85	11.42
RELACIONES									
a/c	0.36	0.36	0.33	0.32	0.30	0.28	0.35	0.32	0.29
arena/cemento	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO									
Revenimiento									
sin aditivo	-	-	-	-	-	-	-	-	-
con aditivo	10.7	24.0	14.0	Fluida	24.0	8.3	9.5	11.0	15.0
aire (%)	2.2	1.7	2.4	1.3	1.8	2.3	2.4	2.4	2.2
P.V.f.	2301.0	2313.0	2318.0	2347.0	2358.0	2363.0	2286.0	2296.0	2329.0
Temperaturas									
mezcla	22.5	21.0	21.0	21.0	22.0	22.0	21.0	22.0	22.0
molde min.	26.0	22.5	22.0	23.5	23.5	22.0	23.5	22.5	23.5
molde max	43.5	44.5	44.0	40.5	44.0	42.0	46.5	42.0	46.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO									
P.V.e.	2302	2331	2333	2355	2356	2350	2258	2285	2297
Pve/PVf	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99
f'c cubos	496.9	494.7	554.7	555.6	549.3	558.2	563.1	523.1	638.7
	402.2	480.0	508.4	514.2	558.7	487.2	540.0	537.8	635.1
	349.3	523.6	478.2	532.0	547.1	543.6	525.3	541.3	704.0
f'c 24 horas	416	499	514	534	552	530	543	534	659
CV cubos (%)	17.97	4.44	7.50	3.89	1.12	7.08	3.51	1.81	5.88
f'c cilindros	606.2	628.8	667.9	682.8	719.7	720.7	566.8	639.3	665.2
	603.2	588.6	672.9	709.3	704.9	677.2	555.3	653.8	681.0
	566.0	643.1	653.6	720.8	716.4	740.1	561.6	638.6	680.4
f'c 28 días	592	620	665	704	714	713	561	644	676
CV cilindros (%)	3.78	4.56	1.51	2.77	1.09	4.52	1.03	1.33	1.33
f'c 24h/f'c 28 d	0.70	0.81	0.77	0.76	0.77	0.74	0.97	0.83	0.98

**TABLA 15: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO PH, RH Y MICROSILICE**

MEZCLA	44	45	46	
Cemento	498.00	498.00	588.00	Mezcla 44
Microsilíce	75.00	75.00	0.00	Dejamos la arena y grava en agua por 24 horas.
Cementante	573.00	573.00	588.00	Decantamos a las 24 horas
Arena	692.00	692.00	710.00	<i>Procedimiento de colado</i> : arena y grava se revolvieron.
Grava	911.00	911.00	934.00	Incluimos el cementante, revolvimos.
Agua	142.00	136.00	132.00	Incorporamos el agua de diseño (lo restante).
Polyheed (%)	0.18	0.18	0.18	Incorporamos los aditivos PH y luego el RH.
Polyheed (kg/m ³)	1.03	1.03	1.03	Fue necesario agregar más RH y agua para darle
Rheobuild (%)	5.80	5.80	5.80	mayor plasticidad.
Rheobuild (kg/m ³)	34.27	34.27	35.16	
RELACIONES				Mezcla 45
a/c	0.25	0.24	0.22	<i>Procedimiento de colado</i> : arena y grava se revolvieron.
arena/grava	43/57	43/57	43/57	Incorporamos el agua total de diseño.
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO				Se dejó por 20 minutos para la absorción del agua.
Revenimiento con aditivo	24.0	24.0	24.0	Incluimos el cementante, se revolvió.
aire (%)	1.7	1.6	1.3	Incorporamos el aditivo PH y luego el RH.
P.V.f.	2353	2345	2395	Fue necesario más agua para darle plasticidad.
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO				En ambos casos empleamos (según artículo SP-153)
P.V.e.	2324	2340	2390	PH: 1.1 kg/m ³
PVe/PVf	0.99	1.00	1.00	RH: 35 kg/m ³
Pc cilindros	590.70	668.50	575.50	Mezcla 46
	539.60	689.70	554.80	Idem 45, sólo cemento.
CV cilindros (%)	6.39	2.21	2.59	

**TABLA 16: PROPORCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS
SERIE ADITIVO RH Y MICROSILICE
VARIOS CONSUMOS DE CEMENTO**

MEZCLA	47	48	49	50	51	52
Cemento	335.00	382.00	429.00	333.00	382.00	426.00
Microsilice	18.00	20.00	23.00	18.00	20.00	22.00
Cementante	352.00	402.00	451.00	350.00	402.00	449.00
Arena	793.00	775.00	756.00	780.00	763.00	739.00
Grava	1046.00	1022.00	994.00	1029.00	1008.00	976.00
Agua	161.00	161.00	161.00	170.00	171.00	169.00
Rheobuild (%)	1.42	1.25	1.11	1.43	1.24	1.11
Rheobuild (kg/m ³)	5.00	5.03	5.01	5.01	4.98	4.98
RELACIONES						
a/c	0.46	0.40	0.36	0.49	0.43	0.38
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO						
Revenimiento sin aditivo	-	-	-	-	-	-
con aditivo	3.0	4.8	2.8	10.0	10.0	10.0
aire (%)	1.8	1.8	2.3	1.7	1.8	2.2
P.V.f.	2358.0	2359.0	2365.0	2332.0	2344.0	2341.0
Temperaturas						
mezcla	18.0	18.0	19.0	15.0	15.0	16.0
molde mín.	19.0	19.0	22.0	17.0	17.0	18.0
molde máx.	32.0	32.0	39.0	26.0	31.0	32.0
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO						
P.V.e.	2375	2361	2390	-	-	-
PVe/PVf	1.01	1.00	1.01	-	-	-
f _c cubos	288.9	316.9	498.7	148.0	186.7	287.1
	278.2	304.9	472.9	143.1	184.9	288.0
	293.3	300.0	427.6	150.2	190.2	298.7
f_c 24h	287	307	466	147	187	291
CV cubos (%)	2.71	2.83	7.72	2.47	1.44	2.22
f _c cilindros	521.9	558.3	587.5	447.5	508.7	644.20
	510.9	548.9	595.3	451.9	503.1	626.00
	481.7	553.8	600.7	450.8	498.7	621.60
f_c 28 d	505	554	595	450	504	631
CV cilindros (%)	4.12	0.85	1.12	0.51	1.00	1.90
f _c 24h/f _c 28 d	0.57	0.55	0.78	0.33	0.37	0.46

TABLA 17 : MATERIAL PARA CABECEO DE ESPECIMENES CILINDRICOS

MEZCLAS			
AZUFRE (%)	MATERIAL (No. malla)	CANTIDAD (%)	RESISTENCIA A COMPRESION (kg/cm²)
100			330
67	Polvo de arena pasada por malla No. 100	33	677
60	Polvo de arena pasada por malla No. 100	40	707
55	Polvo de arena pasada por malla No. 100	45	810
55	Polvo de arena pasada por malla No. 200	45	835
55	Polvo de arena pasada por malla No. 325	45	692

TABLA 18 - MEZCLAS DEFINITIVAS

MEZCLA	A	B	C	D	E	F
Materiales: Cemento Tipo I, arena andesitica, grava caliza TM 3/8"						
Cemento	332.5	400.0	380.0	427.5	468.0	488.6
Microsilíce	17.5	-	20.0	22.5	24.6	-
Cementante	350	400	400	450	493	489
Arena	778	766	758	741	718	733
Grava	1026	1007	1002	978	948	968
Agua	169	165	170	170	166	162
Rheobuild (%)	1.43	1.25	1.25	1.11	1.00	0.98
kg/m ³	5.0	5.0	5.0	5.0	4.9	4.8
Relaciones						
a/c	0.48	0.41	0.43	0.38	0.34	0.33
arena/grava	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57	43/57
Propiedades en estado fresco						
Rev. con aditivo	11.5	20.0	15.0	12.5	6.0	15.0
Aire (%)	2.0	1.2	1.7	2.3	2.7	2.2
P.V.f	2320	2349	2346	2319	2330	2356
Propiedades en estado endurecido						
P.V.e.	2305	2321	2296	2327	2313	2391
Pve/PVf	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	1.01
28 días						
R comp., f'c	416.5	458.8	483.0	534.8	621.7	601.8
R flexión, ff	63.7	59.0	61.8	69.3	79.8	82.3
ff/f'c	15	12.9	12.8	13	12.8	13.7
R tensión ft	37.0	39.0	37.4	39.0	47.0	49.0
ft/f'c	8.9	8.5	7.8	7.3	7.6	8.2
M elasticidad	315351	341926	319772	323796	351107	341414
	308624	348417	322181	315839	335877	352888
	294792	333031	319403	328342	346793	357845
M elást. Promedio	306256	341125	320452	322659	344592	350716
E/Raíz f'c	15006	15926	14583	13953	13820	14297
ff/raíz f'c	3.1	2.8	2.8	3.0	3.2	3.4
ft/raíz f'c	1.8	1.8	1.7	1.7	1.9	2.0
R Poisson	0.22	0.25	0.22	0.22	0.23	0.25
	0.25	0.23	0.12	0.23	0.24	0.26
	0.24	0.23	0.22	0.25	0.24	0.26
u (promedio)	0.23	0.24	0.19	0.23	0.23	0.26
91 días						
R compresión	474.0	535.0	561.7	592.0	725.8	689.0
M elasticidad	333503	337714	346694	368648	376174	363020
R Poisson	0.20	0.22	0.23	0.26	0.26	0.27
119 días						
R compresión	475.4	555.0	589.3	625.8	751.0	678.0
M elasticidad	335215	355916	352558	383026	352778	363793
R Poisson	0.20	0.25	0.21	0.24	0.26	0.26

TABLA 19 : CONTRACCION POR SECADO Y COEFICIENTE DE DEFORMACION DIFERIDA ULTIMO

Mezcla	Cementante (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Contracción por secado última (x 10⁻⁶)	Coefficiente de deformación diferida último
A	350	169	549	2.21
B	400*	165	445	
C	400	170	458	1.45
D	450	170	470	
E	493	166	499	2.04
F	489*	162	588	

* sin microsilice

TABLA 20 : DATOS CONCERNIENTES A ESTRUCTURAS FRANCESAS UTILIZANDO CAD

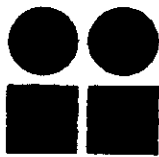
Estructura		Periodo de Construcción	Volumen de CAD (m ³)	Resistencias MPa		Adición de microsílíce	Requerimientos particulares
Nombre	Tipo			Requisito	Promedio		
Normandía	Puente	88-95	35,000	60	82	Si	Via superior
Elorn	Puente	91-94	1,800	80	94	Si	Muy alta resistencia
Garabit	Puente	90-93	60	60	64	No	Color
Biblioteca de Francia	Edificación	92-94	7,000	60	70	No	Color
			50	75	94	Si	Color
Tour Société Generalé	Edificación	93-94	10,800	60	74	Si	Bombeabilidad
Túnel Canal	Túnel	84-92	500,000	55	66	No	Permeabilidad
Barcaza N'Kossa	Fuera de la costa	94-95	2,700	70	79	Si	Permeabilidad
Plataforma Hibernia	Fuera de la costa	92-96	160,000	60	84 (cubos)	Si	Resistencia
Civaux	Contenedor nuclear	92-96	20,000		63	Si	Bombeabilidad

**TABLA 21: EJEMPLOS DE DISEÑOS DE MEZCLAS PARA PROYECTOS
USANDO CAD**

Estructura/Parámetro	Túnel Guldborgsund segmento no. 2 de 2	Proyecto experimental de casas con Concreto de Alta resistencia	El Gran Belt Link	Puente Motorway
Year	1987	1986-87	1988-1995	1991-92
Aprox. (m ³)	2 x 10 ⁴	100	1 x 10 ⁶	800
Composición				
Cemento (kg/m ³)	275	453	330	332
Agregados (kg/m ³)	1840	1855	1803	1870
agua/cementante	0.42	0.21	0.34	0.31
Relación de peso entre la ceniza volante y el total de cementante	0.15	0	0.1	0.12
Relación de peso entre el húmo de sílice y el total de cementante	0.04	0.13	0.05	0.08
Relación de peso entre el agregado fino (menor de 4 mm) y agregado grueso	0	0.75	0	0.57
Relación de peso entre el S y el total de cementante	0	0.013	0	0.02
contenido de aire (%)	7	1	7	1.5
f _{c 28} MPa	45	102	60	80

Apéndice B

Gráficas



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

FIGURA 1 : ARENA ANDESITICA - PRIMERA TANDA

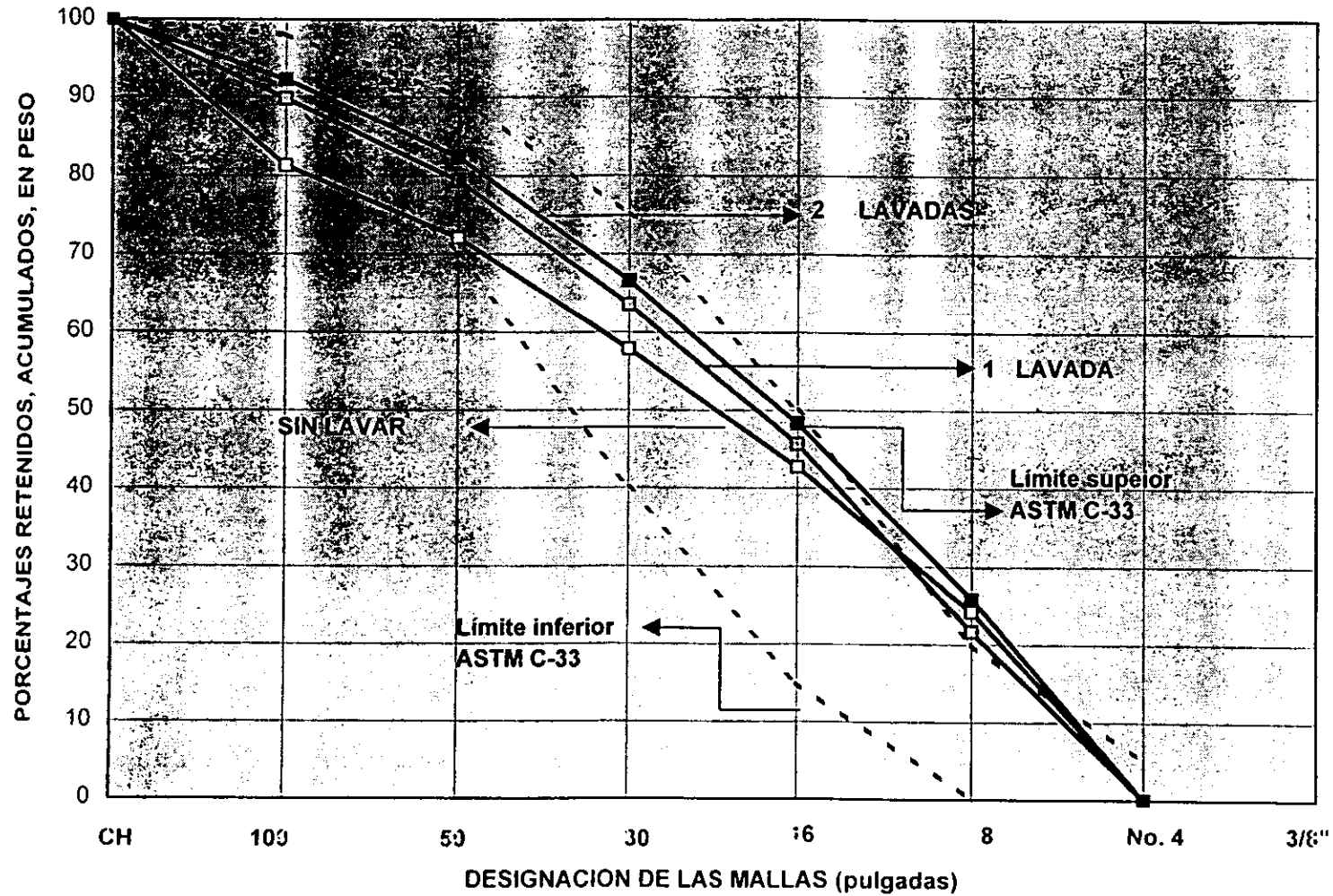


FIGURA 2 : ARENA ANDESITICA - PRIMERA TANDA

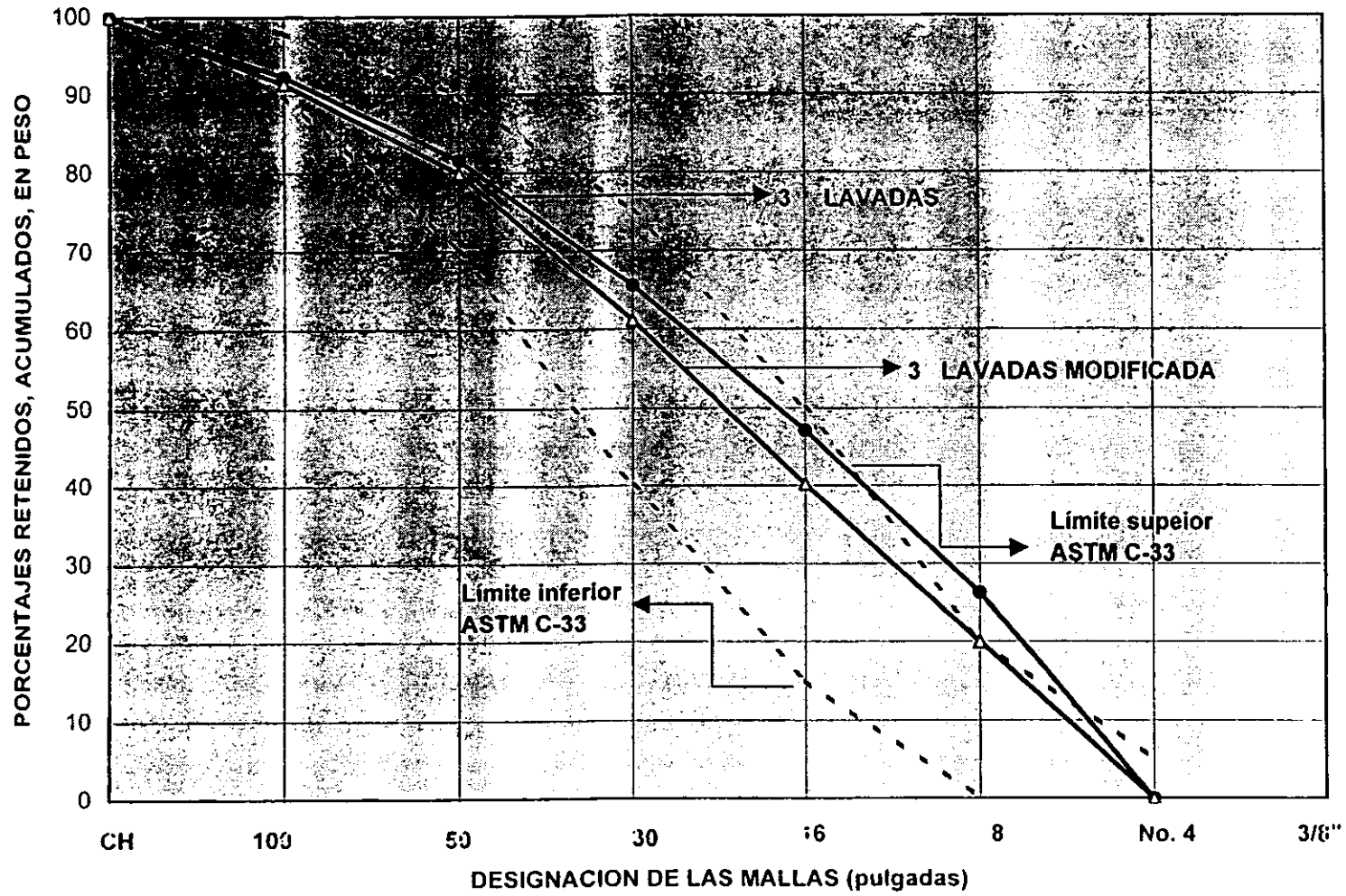


FIGURA 3 : ARENA ANDESITICA - SEGUNDA TANDA

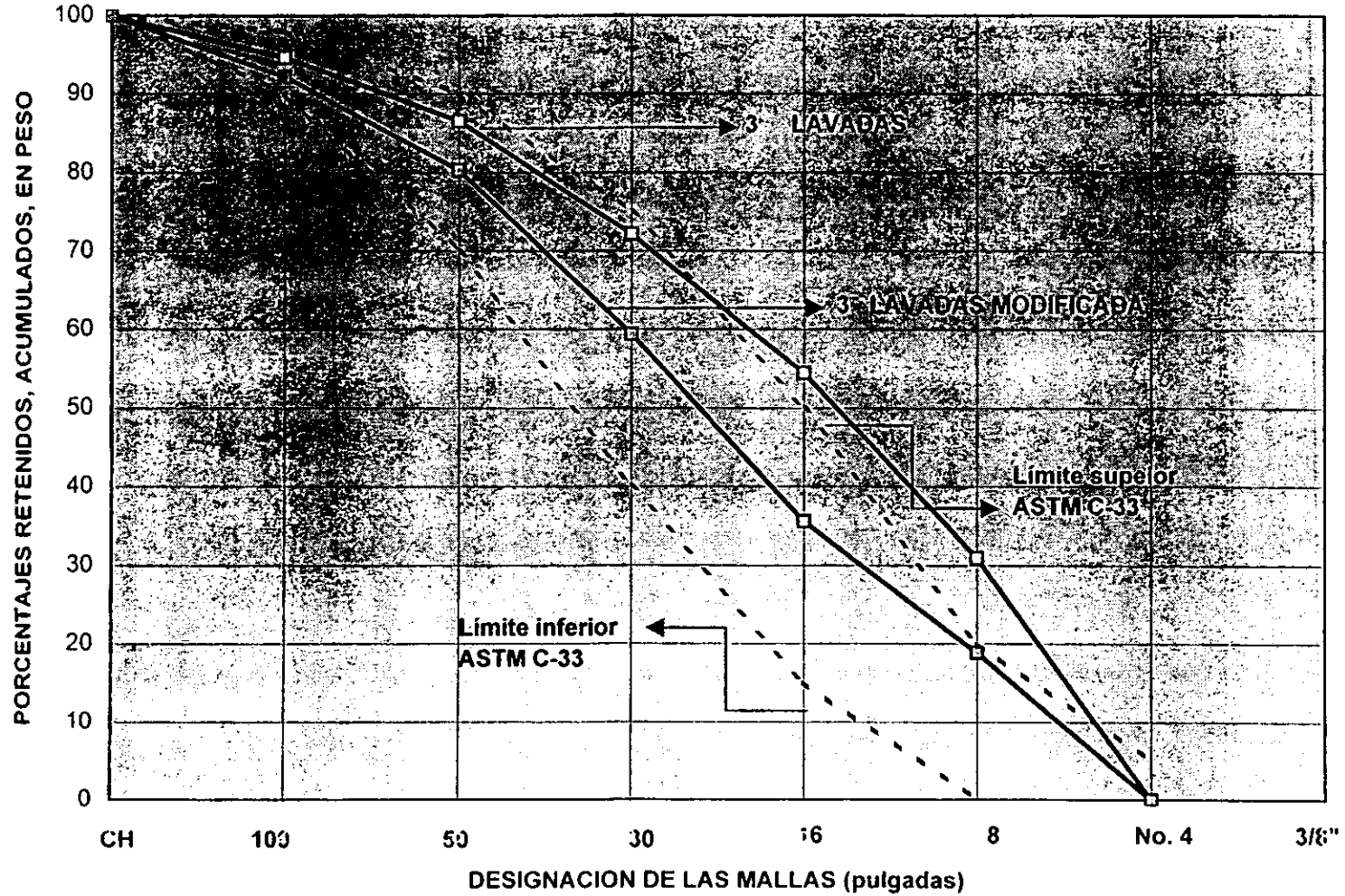


FIGURA 4: GRANULOMETRIA DE GRAVA CALIZA

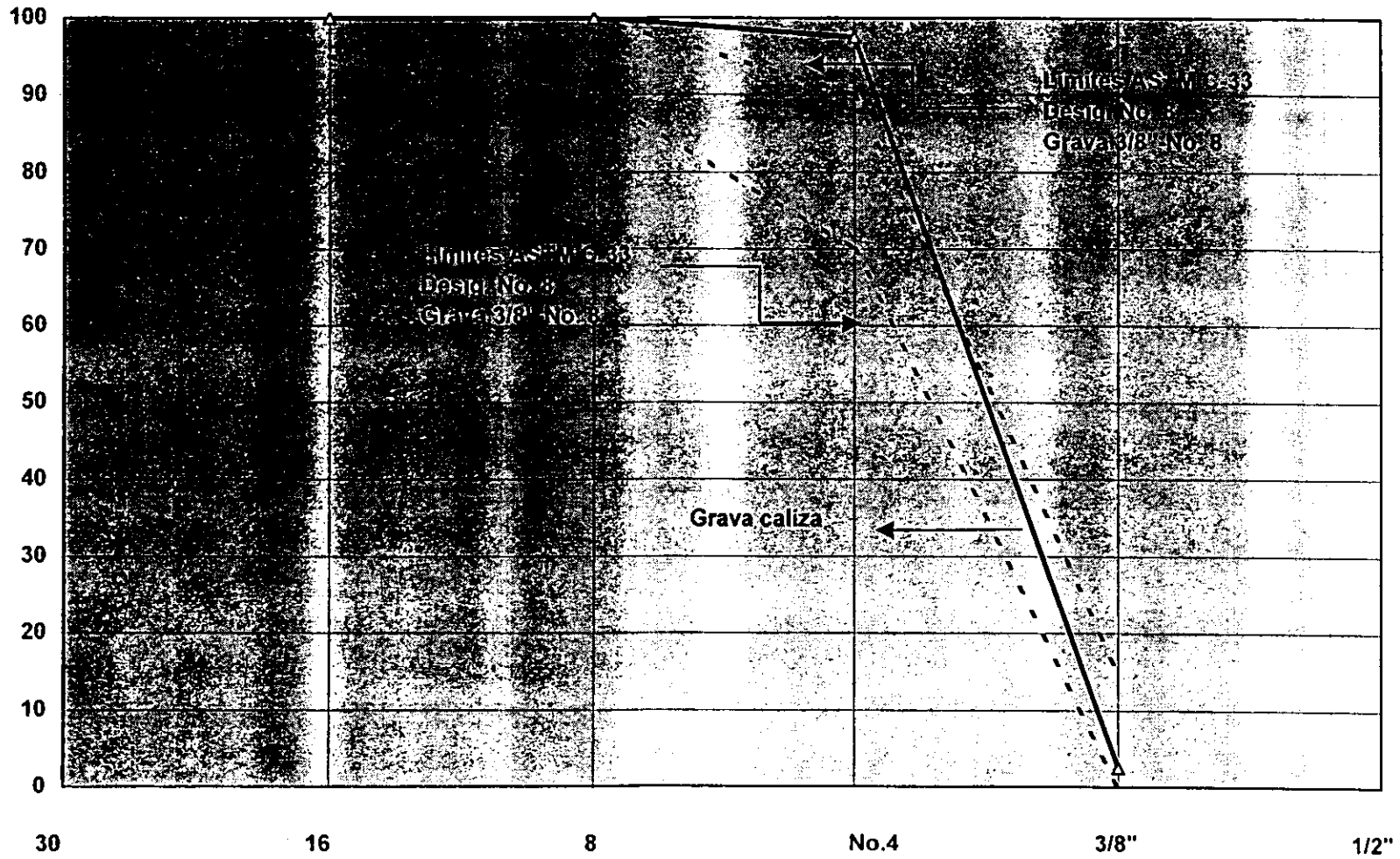


FIGURA 5 : REVENIMIENTO PARA DIFERENTES CONSUMOS DE ADITIVOS SUPERFLUIDIFICANTES DE RANGO MEDIO

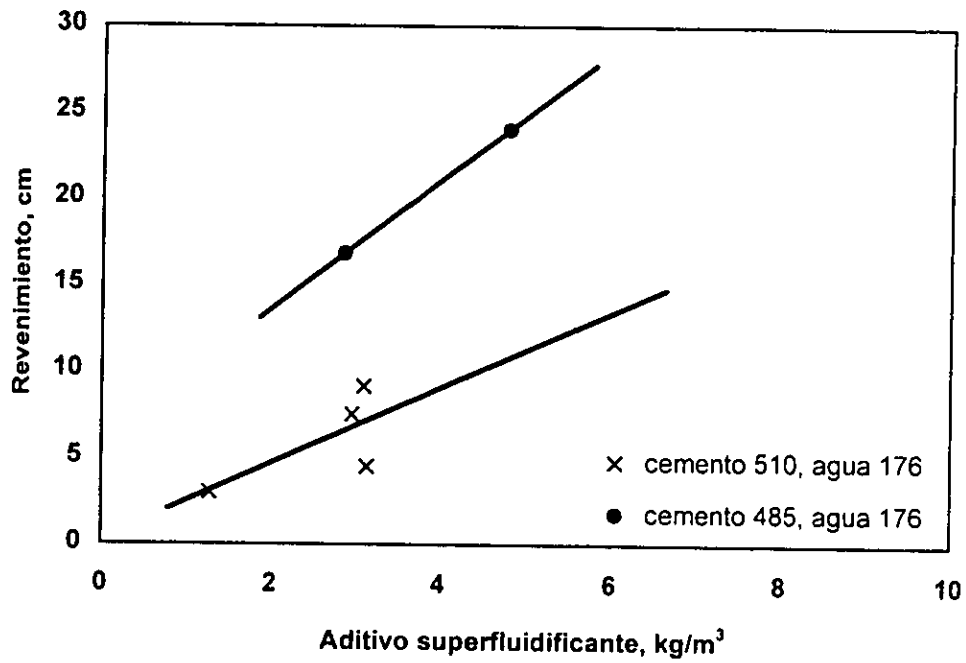


FIGURA 6 : INCREMENTO DE REVENIMIENTO CON EL CONSUMO DE ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE DE RANGO MEDIO

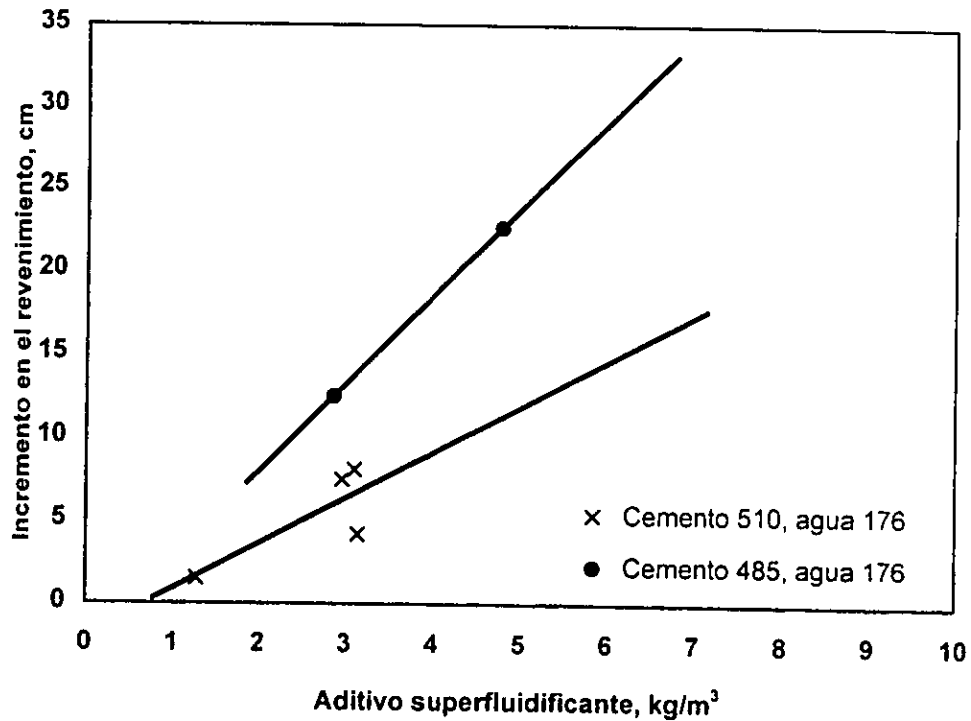


FIGURA 7 : EFECTO DEL ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE EN EL REVENIMIENTO

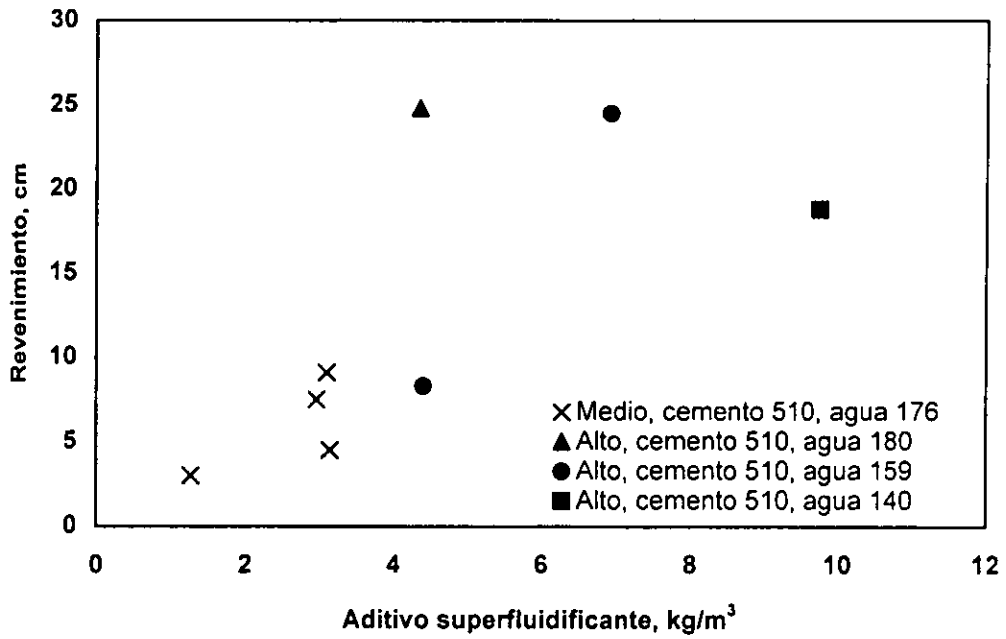


FIGURA 8 : VARIACION DEL REVENIMIENTO CON EL CONSUMO DE AGUA

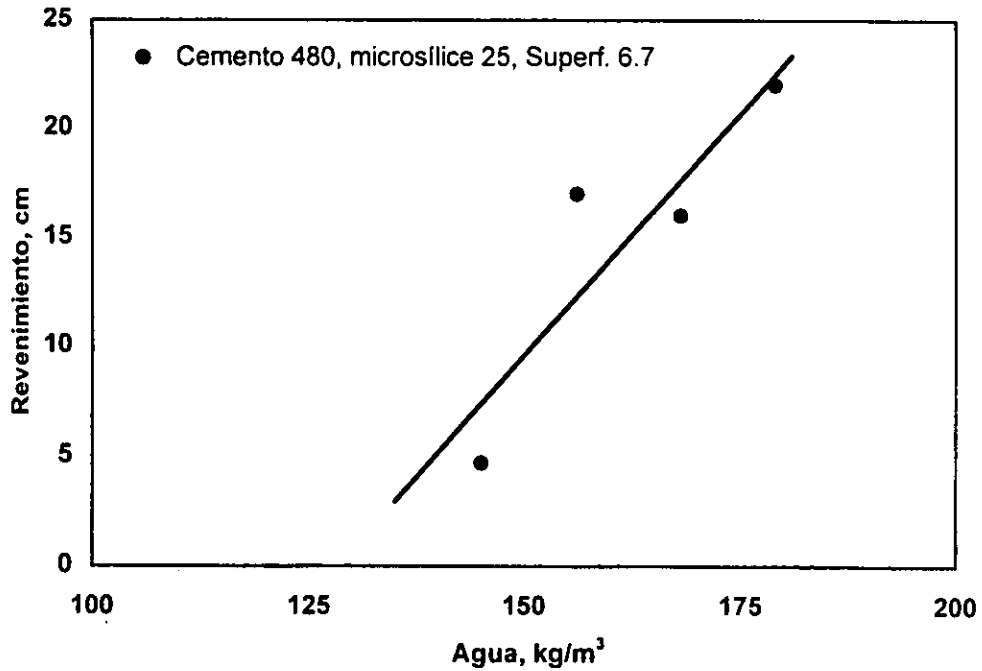


FIGURA 9 : VARIACION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION CON LA RELACION AGUA/CEMENTANTE PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE MICROSILICE

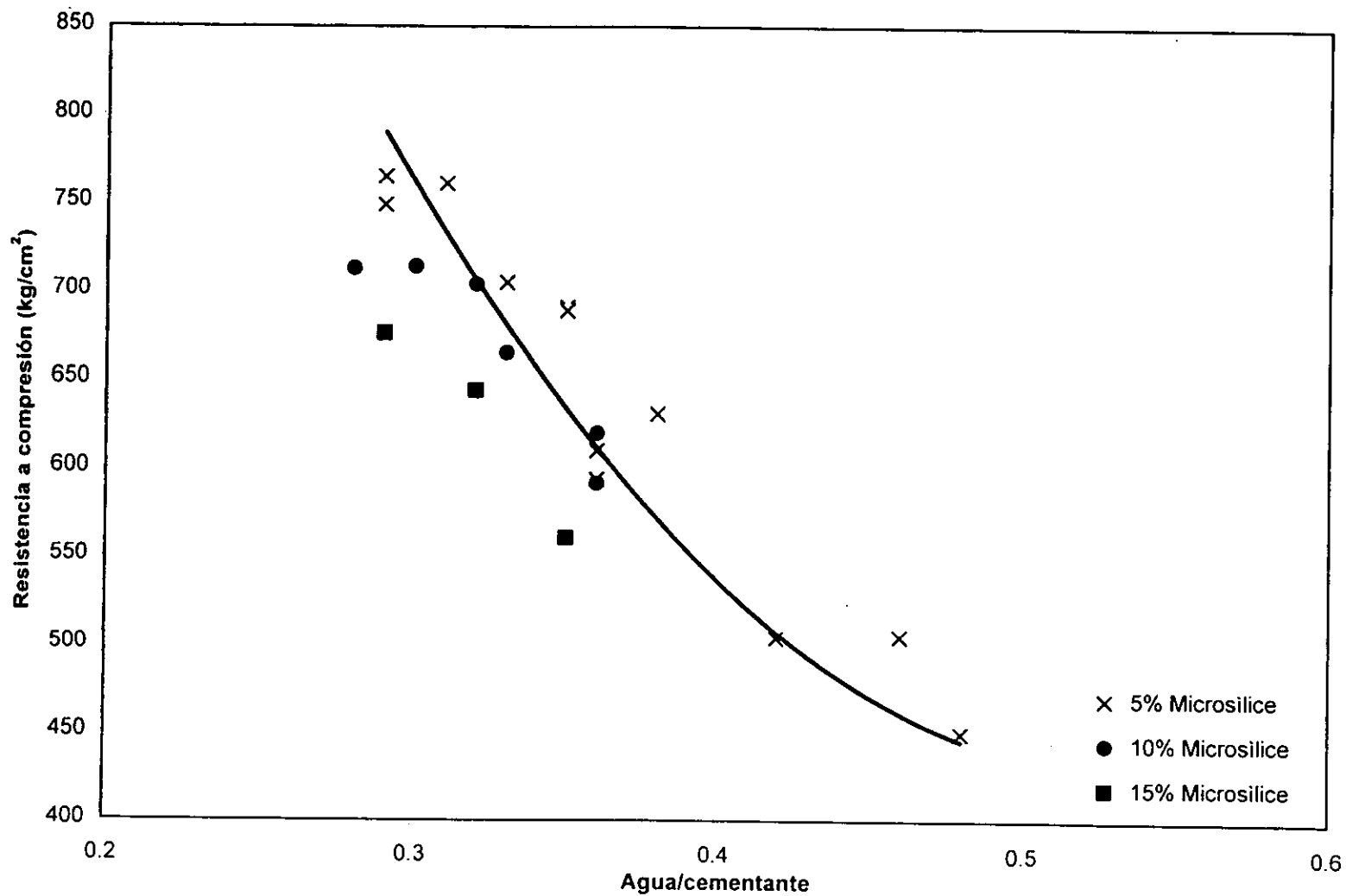


FIGURA 10 : EFECTO DE LA MICROSÍLICE EN LA RESISTENCIA A COMPRESION

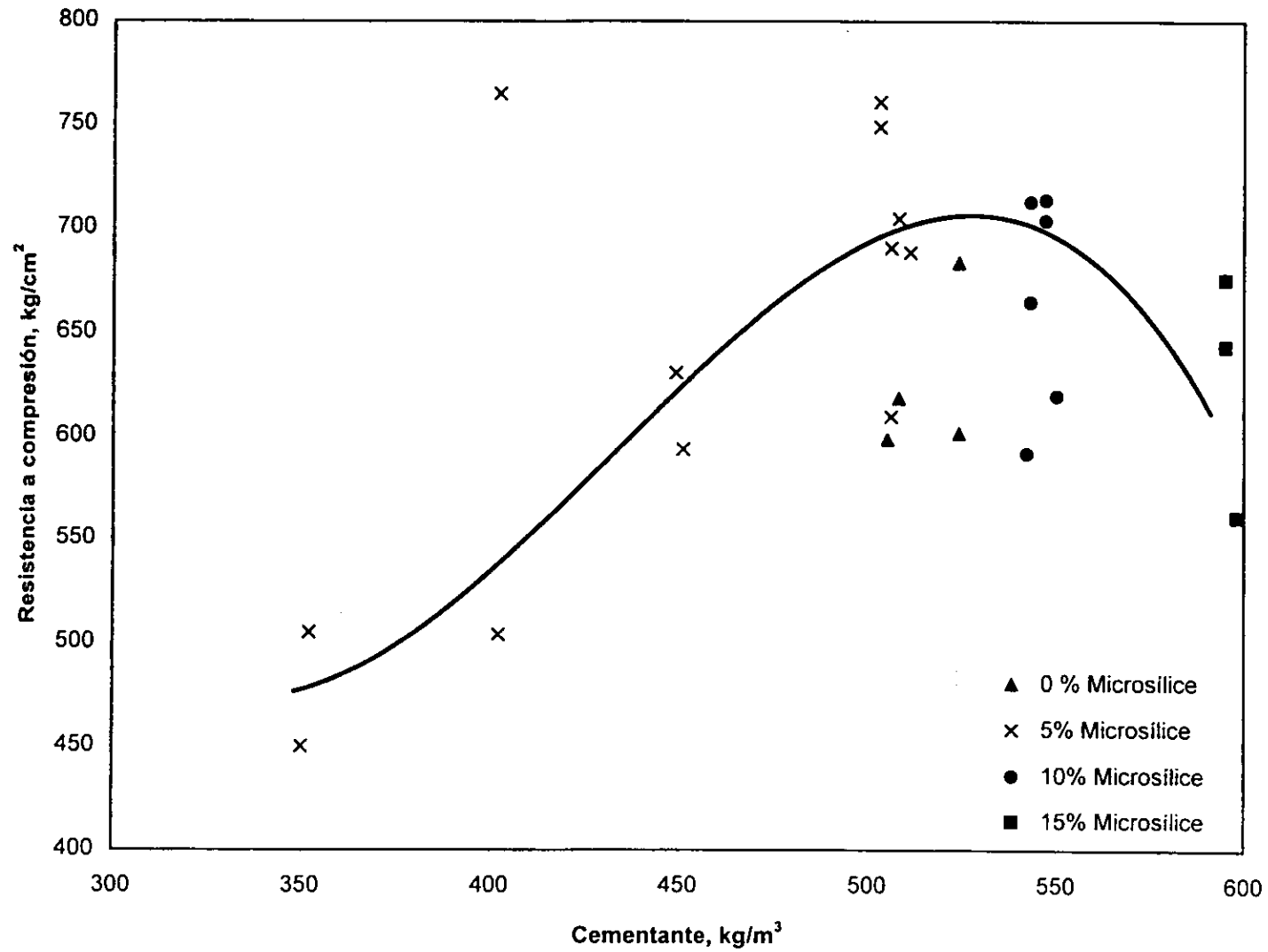


FIGURA 11 : RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESION A 24 HORAS Y 28 DIAS

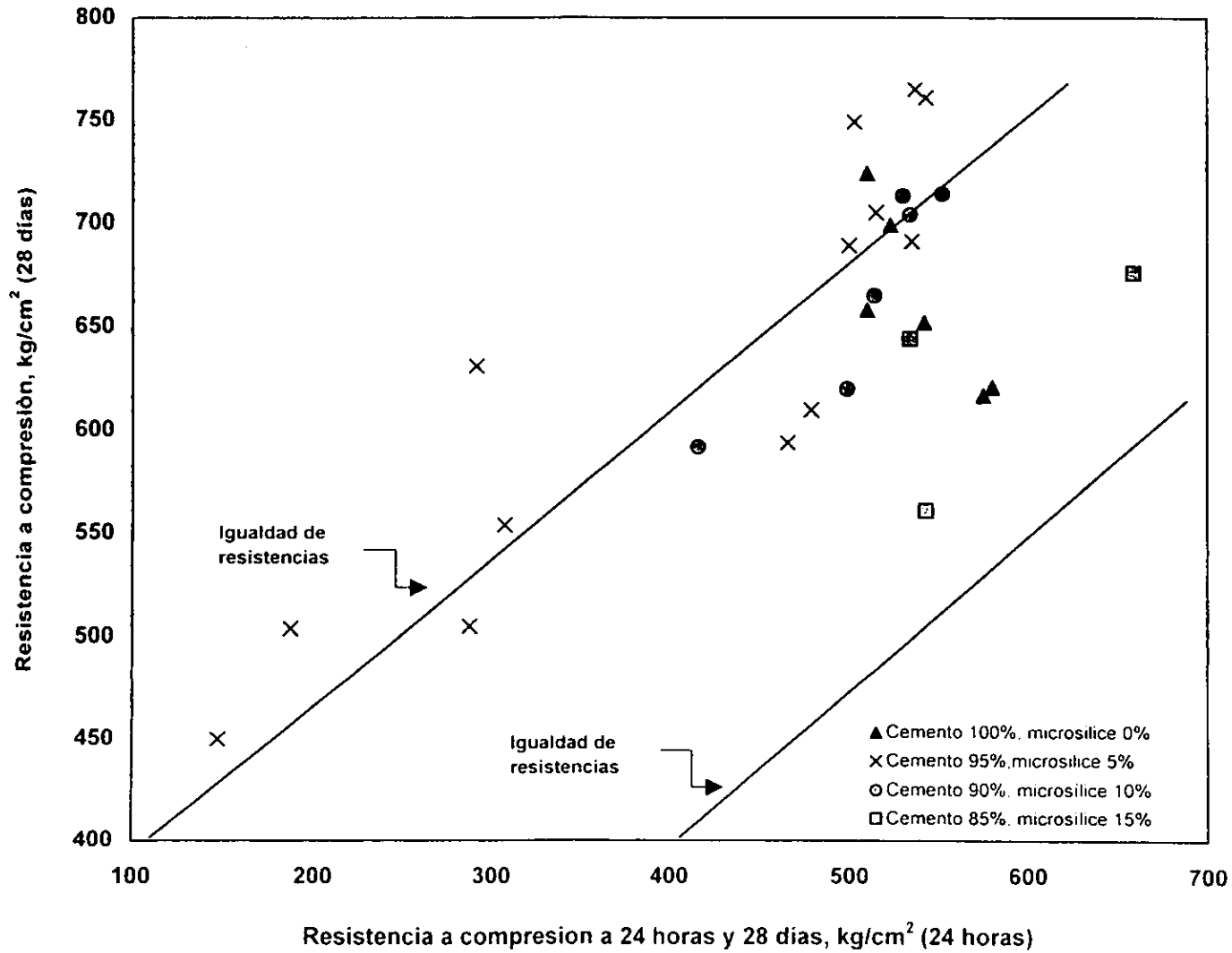


FIGURA 12 : INCREMENTO DE LA RESISTENCIA CON LA EDAD

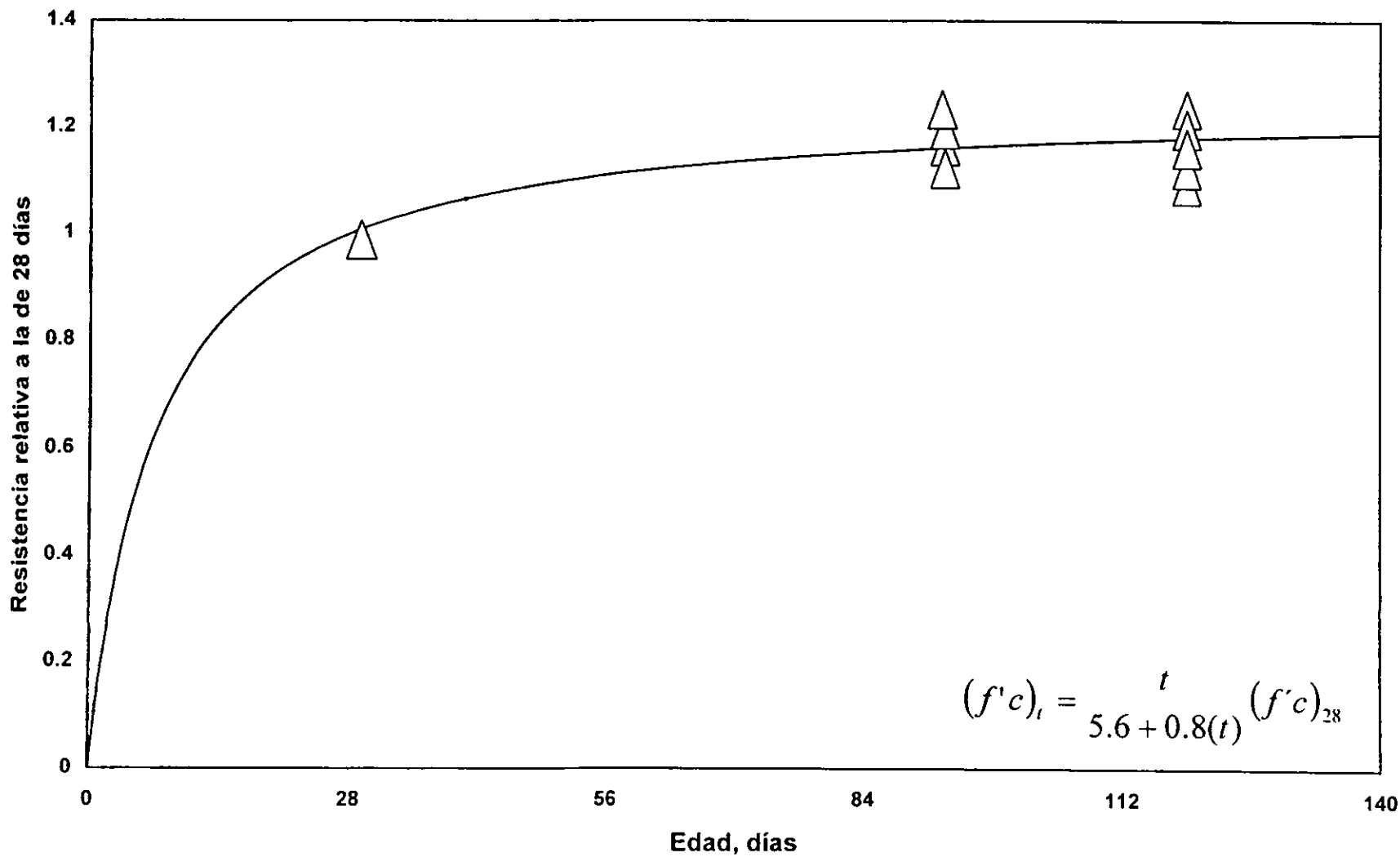


FIGURA 13 : VARIACION DE LA RESISTENCIA A TENSION EN FUNCION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION

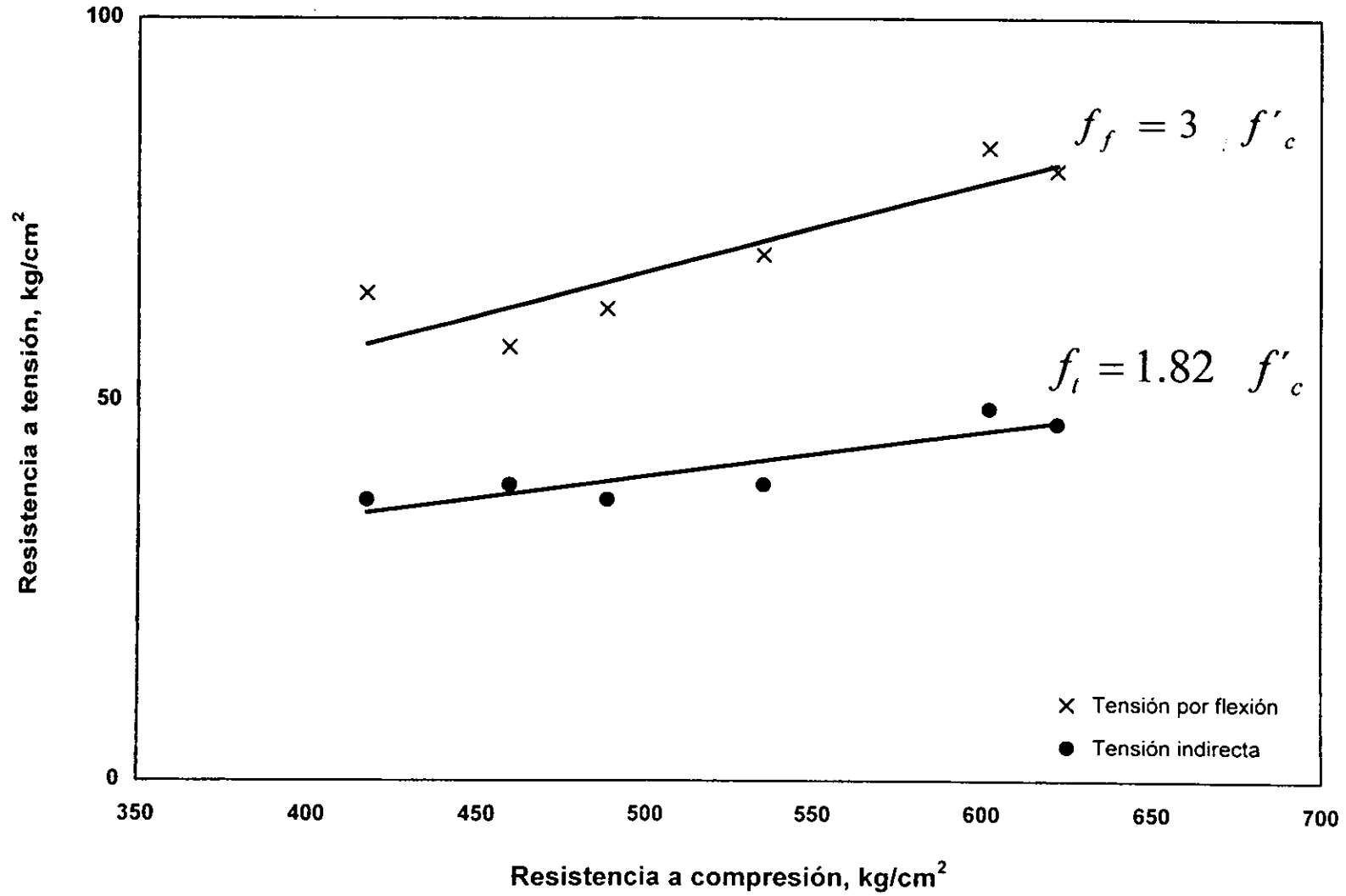


FIGURA 14 : VARIACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD CON LA RESISTENCIA A COMPRESION

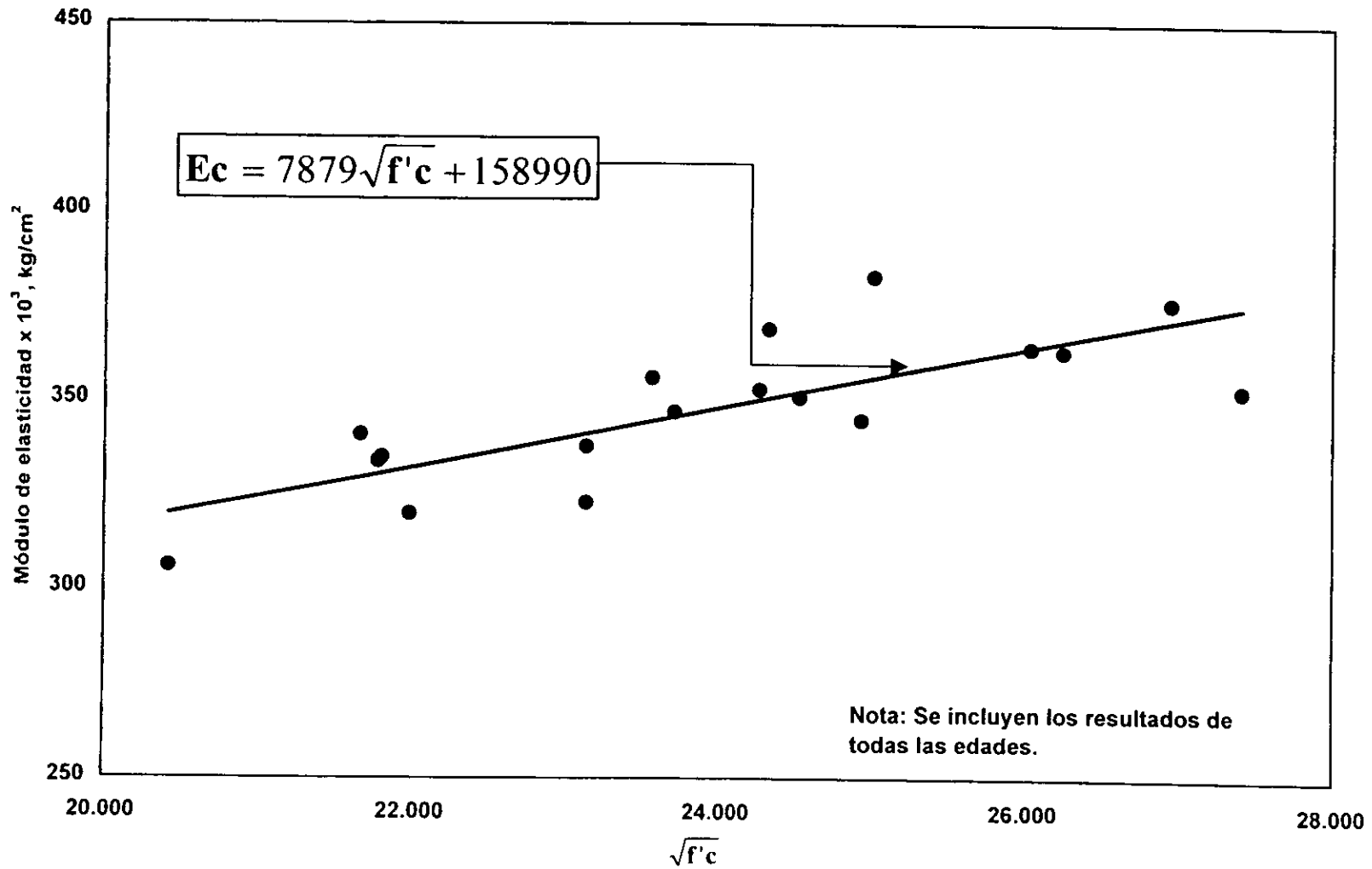


FIGURA 15 : VARIACION DE LA RELACION DE POISSON CON LA RESISTENCIA A COMPRESION Y LA EDAD DEL CONCRETO

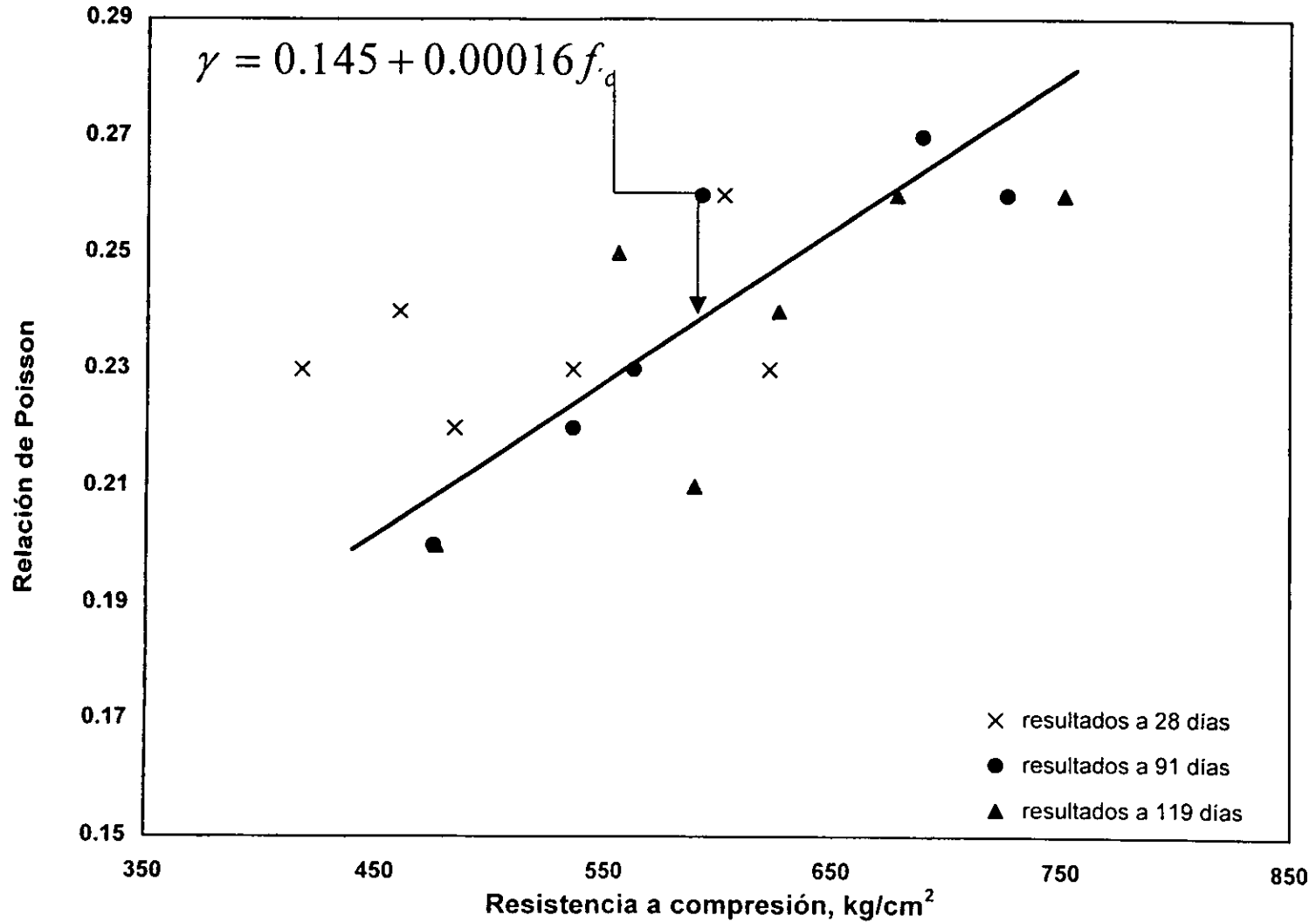


FIGURA 16A : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA A, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

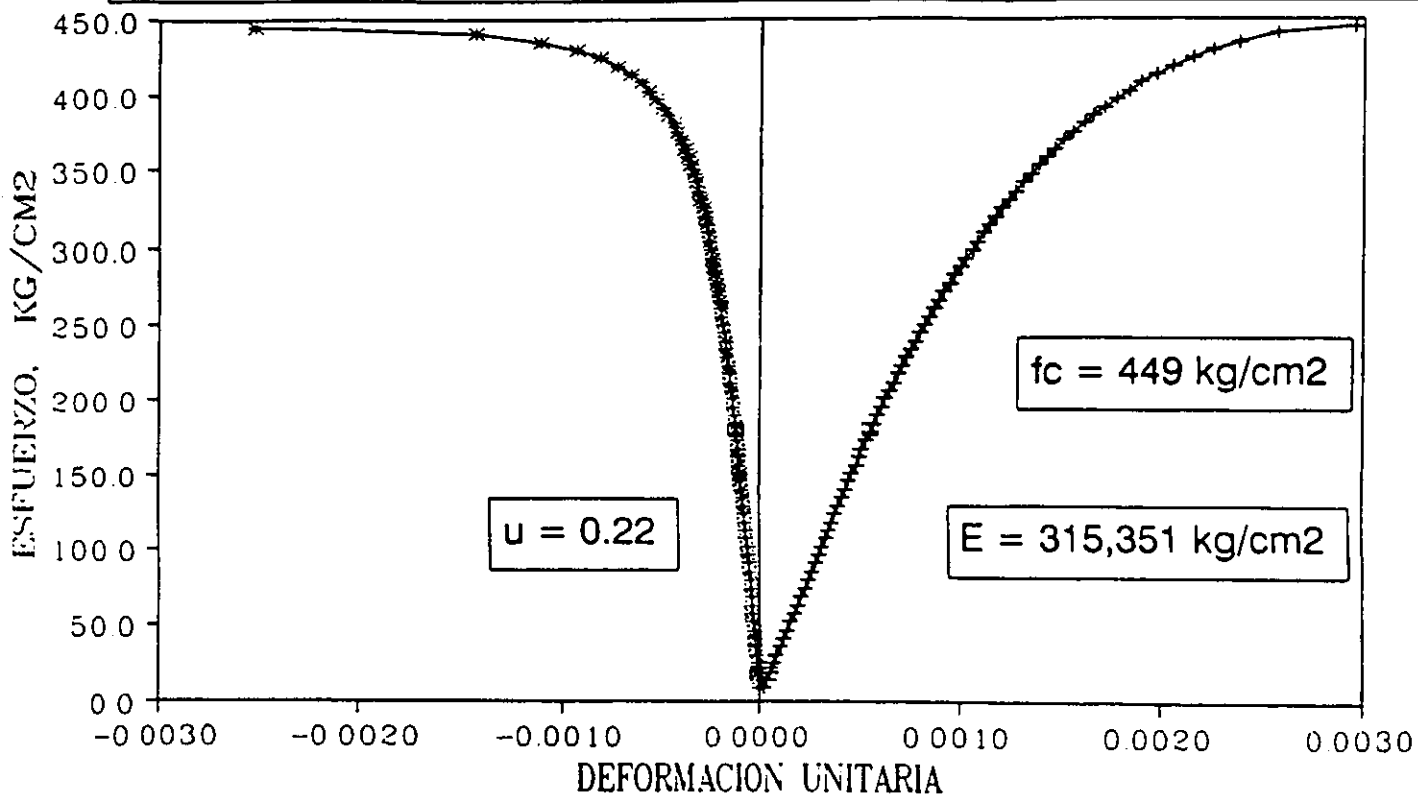


FIGURA 16B : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA A, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

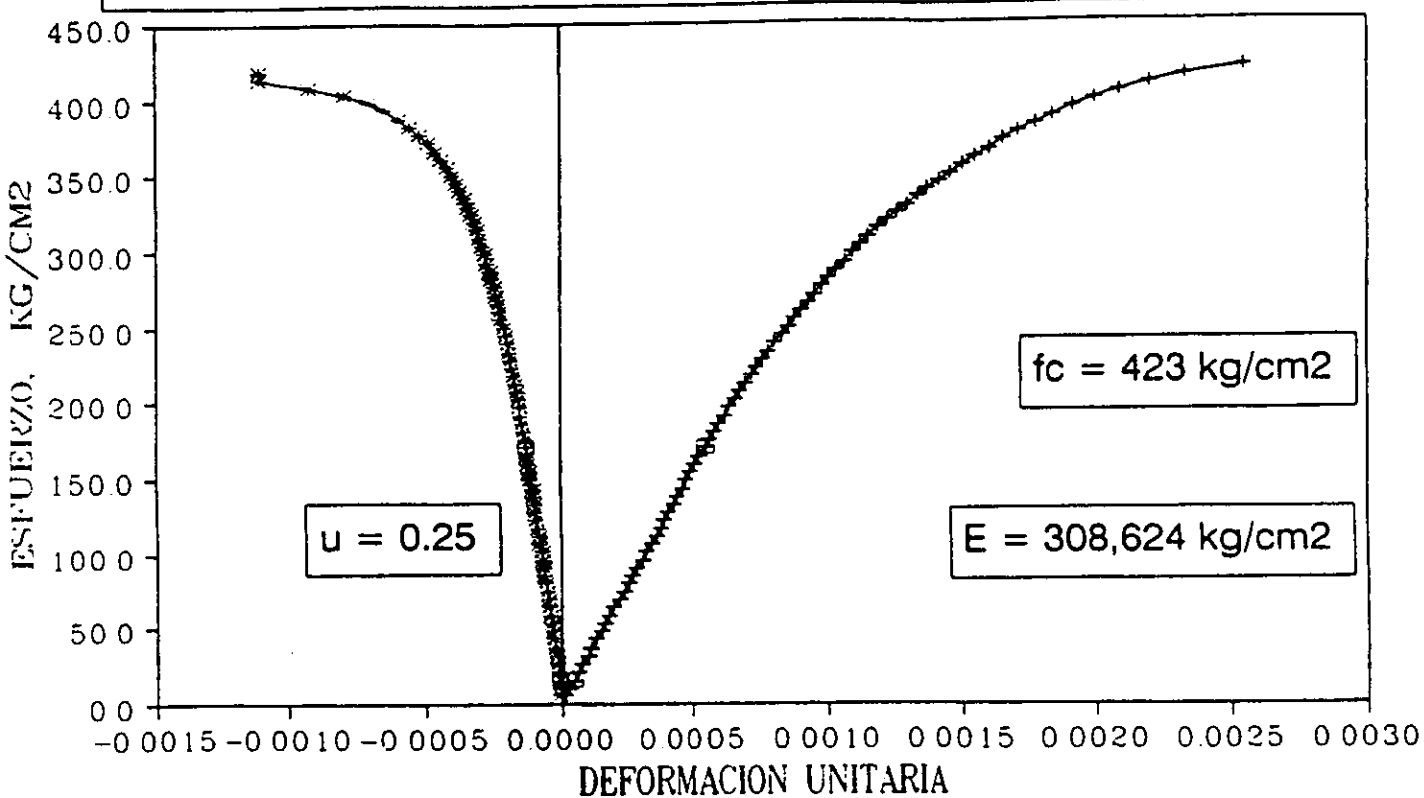


FIGURA 16C : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA A, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

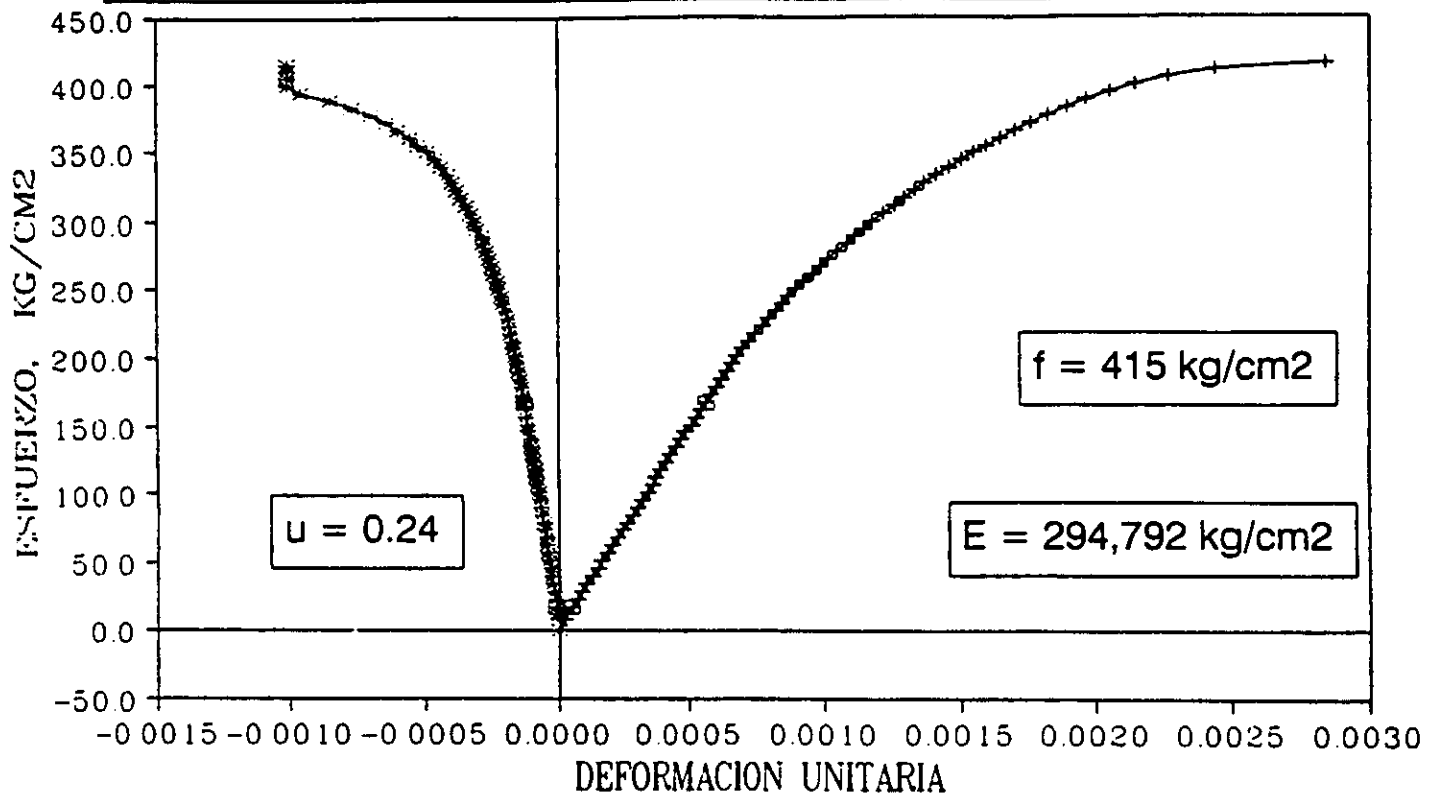


FIGURA 17A : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA B, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

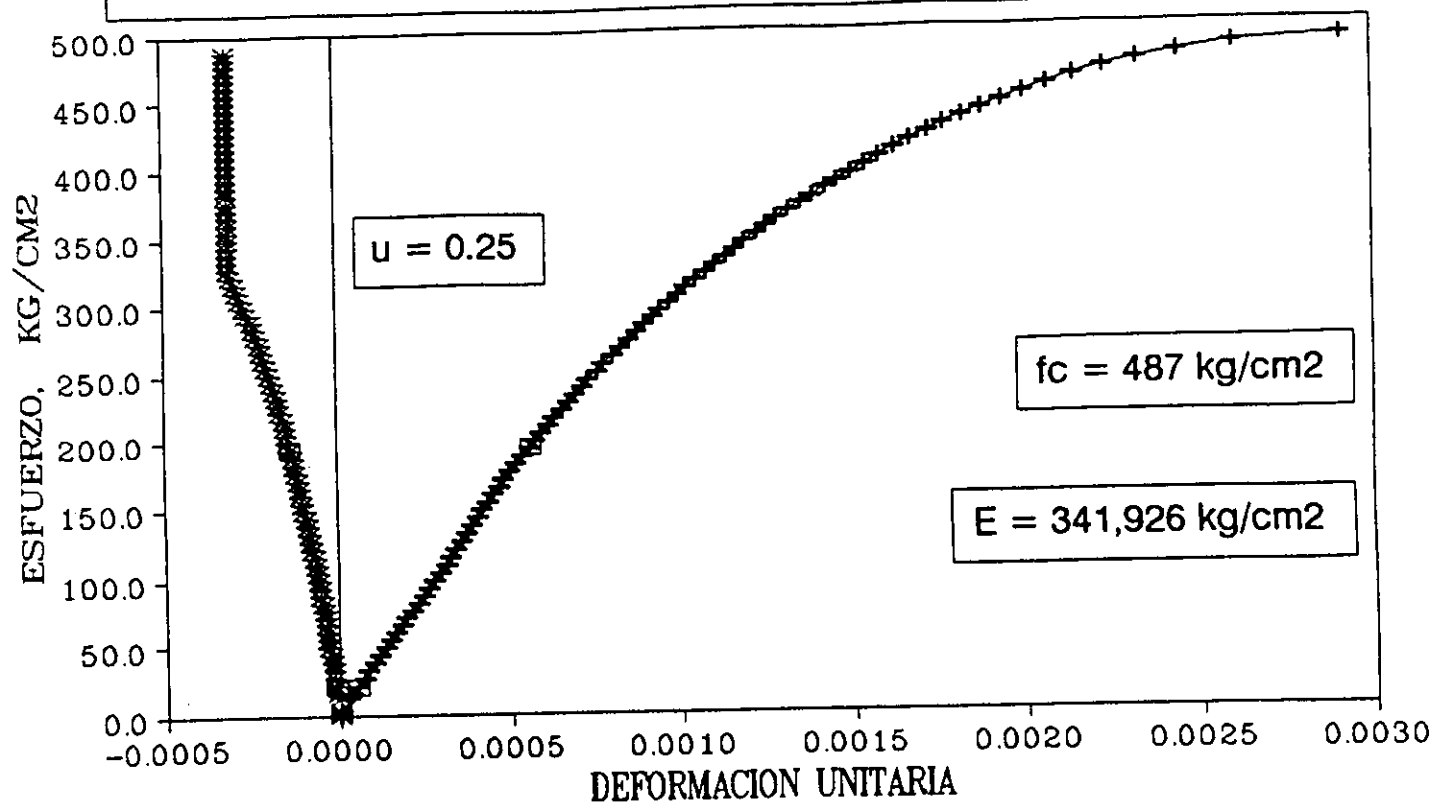


FIGURA 17B : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA B, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

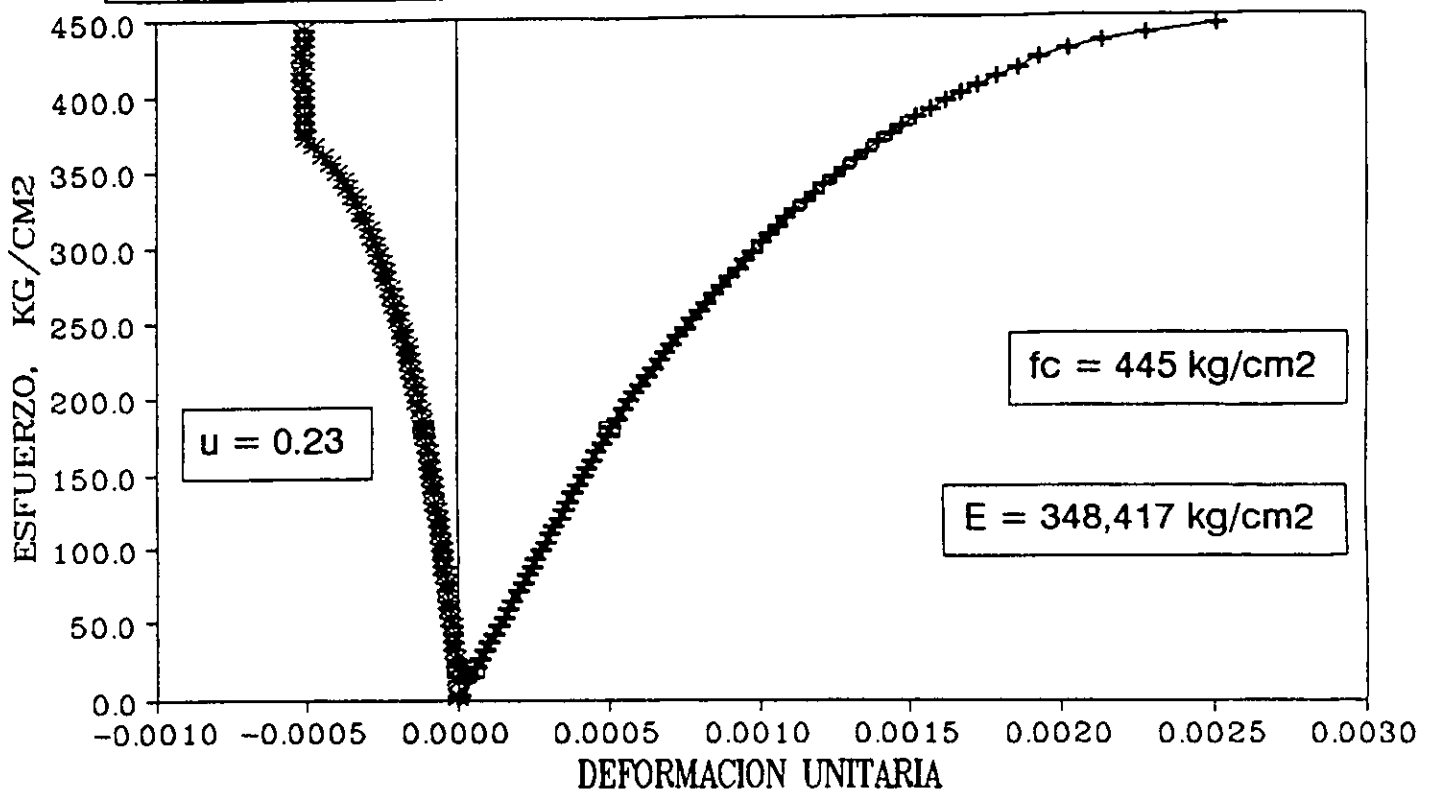


FIGURA 17C : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA B, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

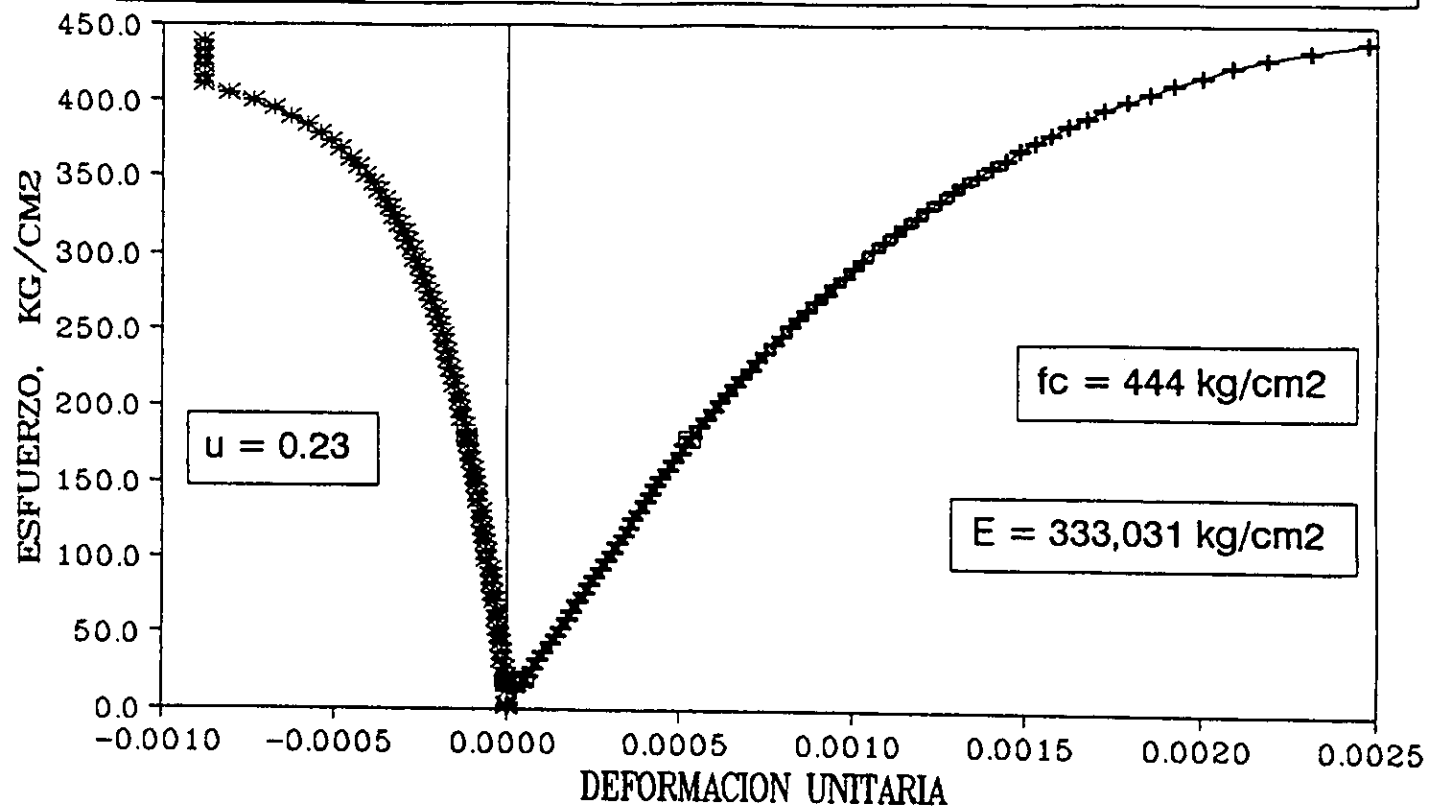


FIGURA 18A : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA C, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

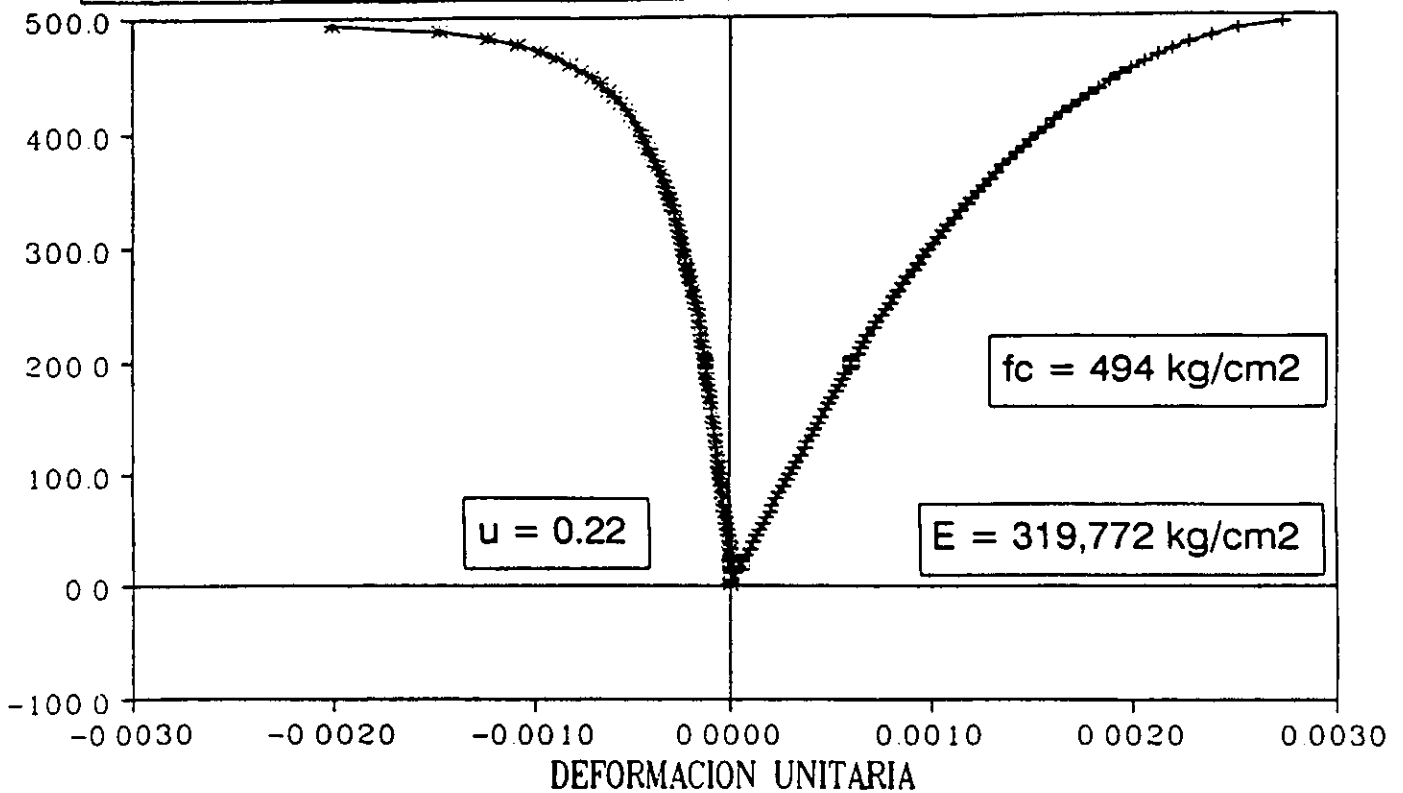


FIGURA 18B : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA C, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

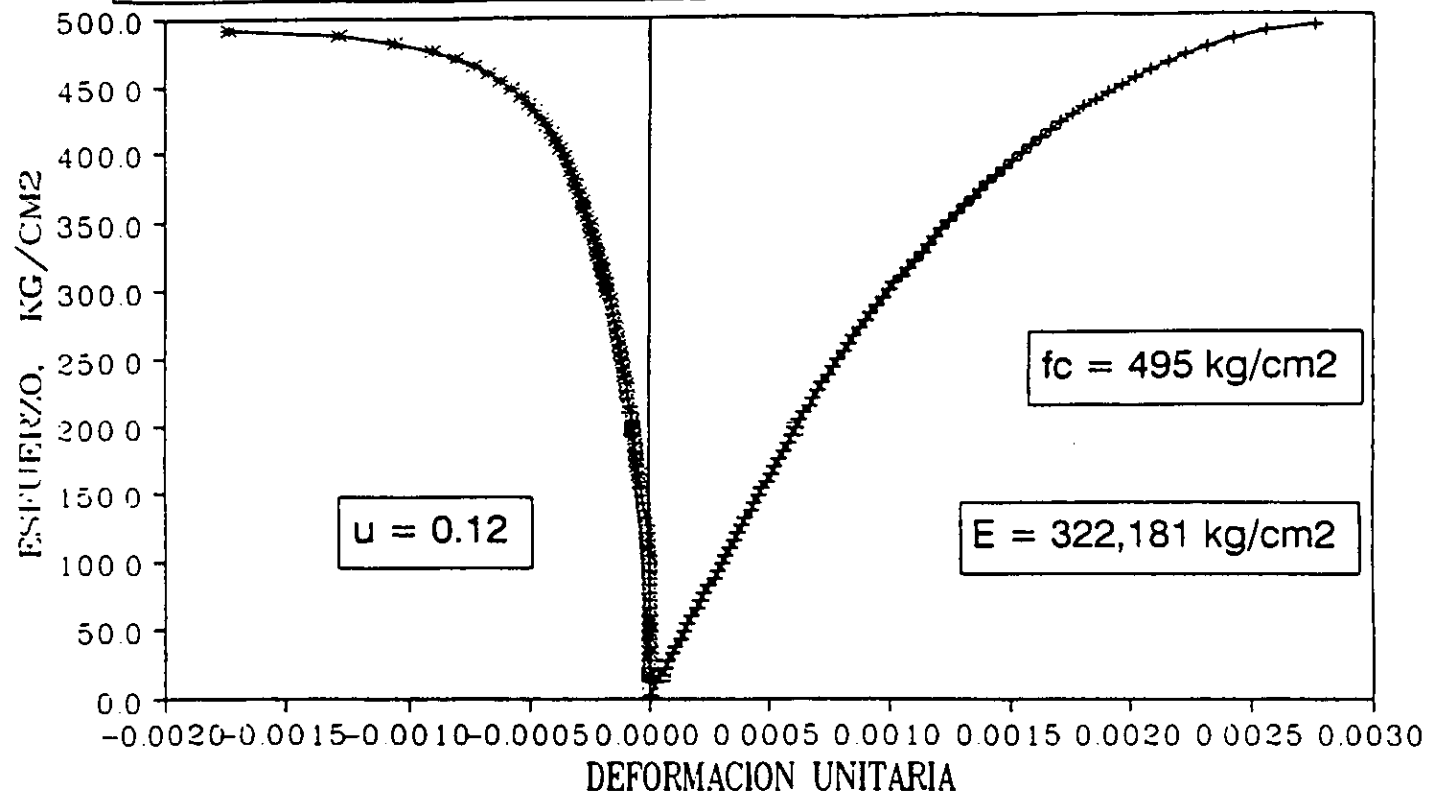


FIGURA 18C : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA C, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

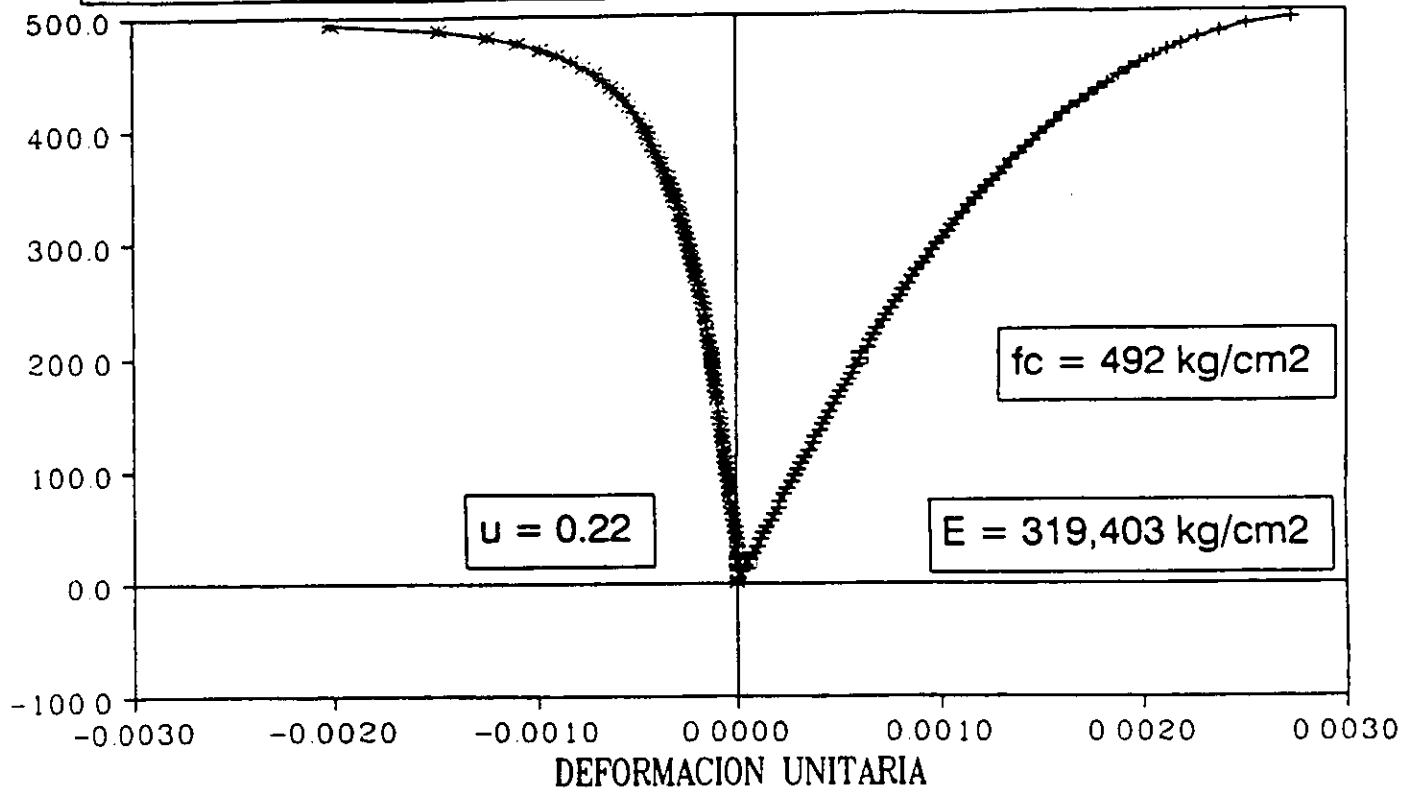


FIGURA 19A : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA D, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

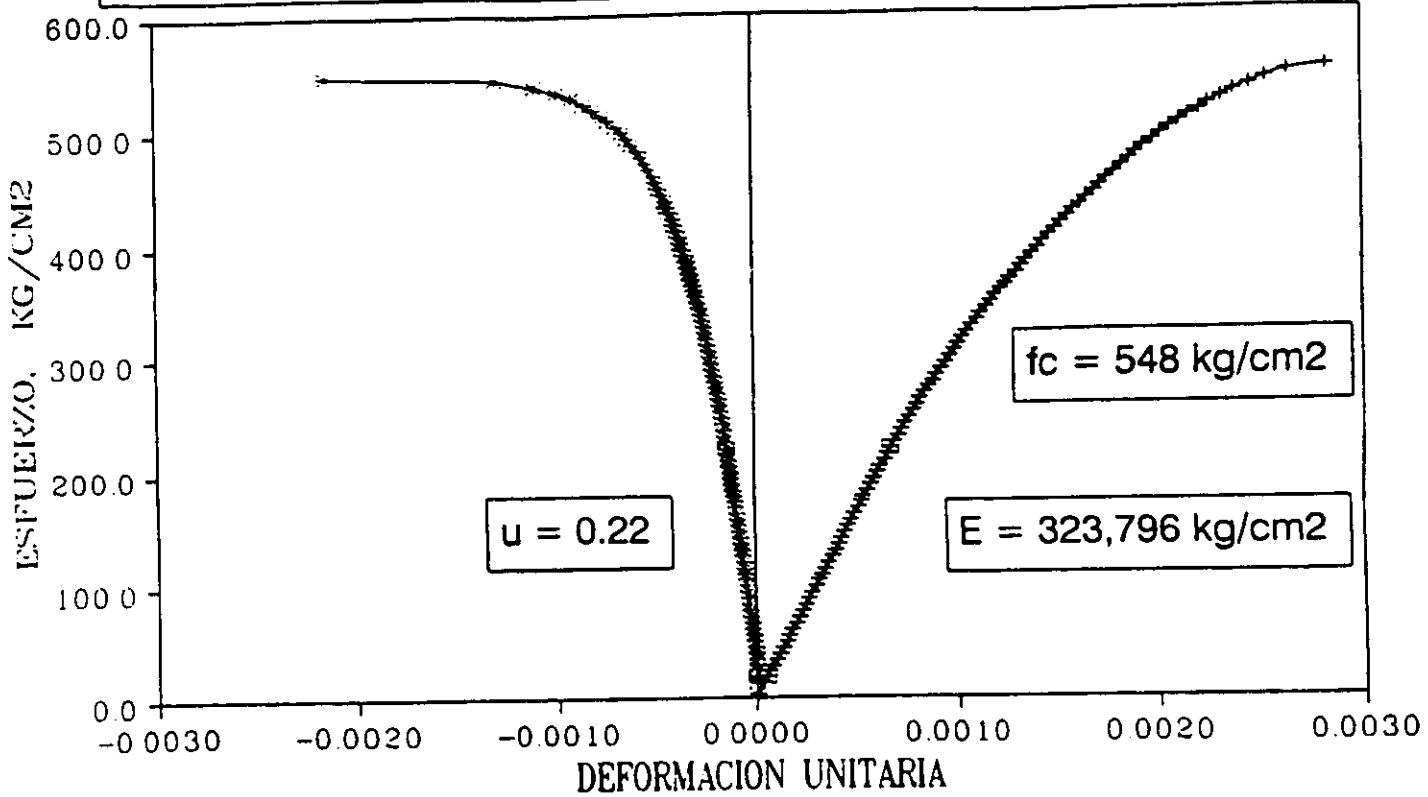


FIGURA 19B : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA D, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

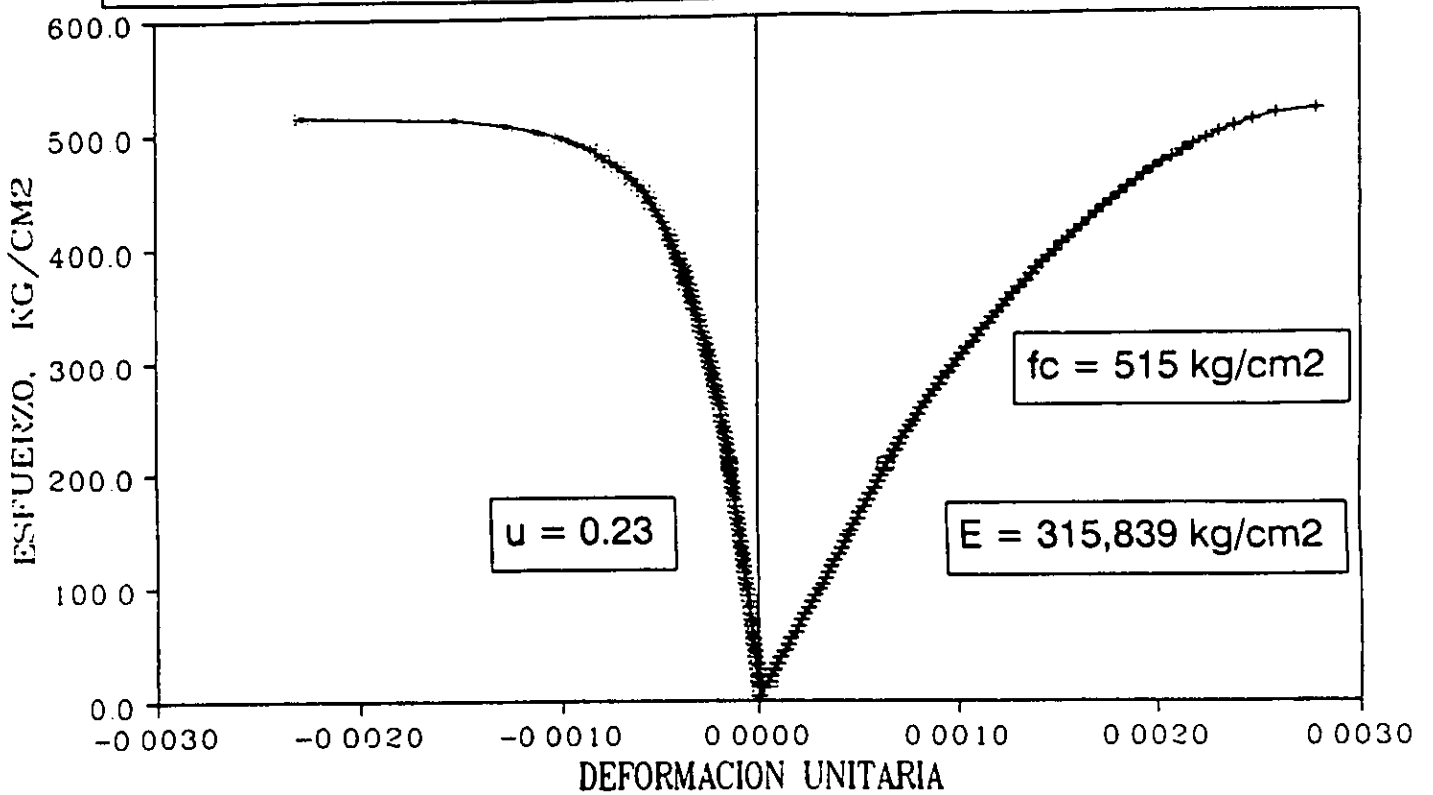


FIGURA 19C : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA D, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

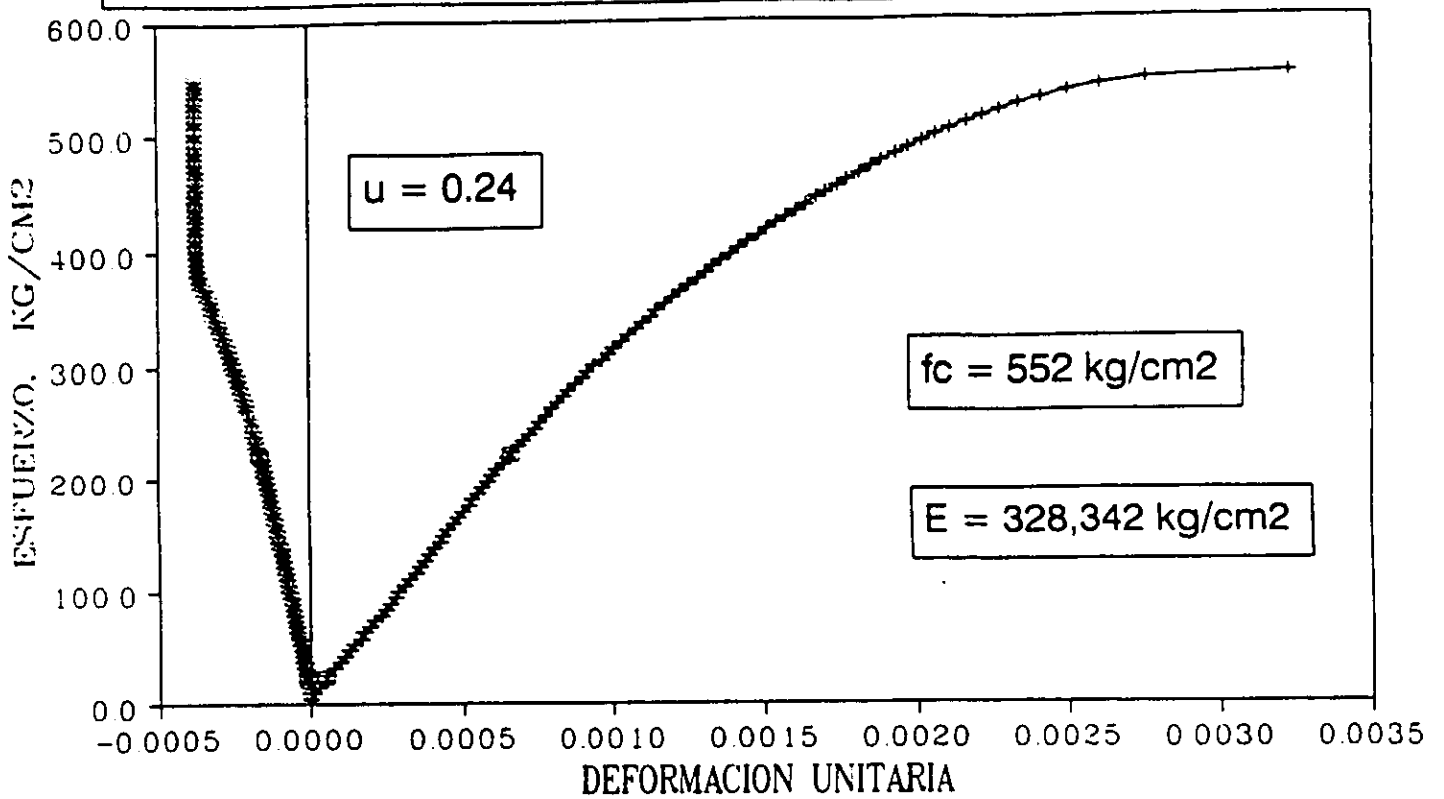


FIGURA 20A : RELACION ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA E, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD - R. POISSON

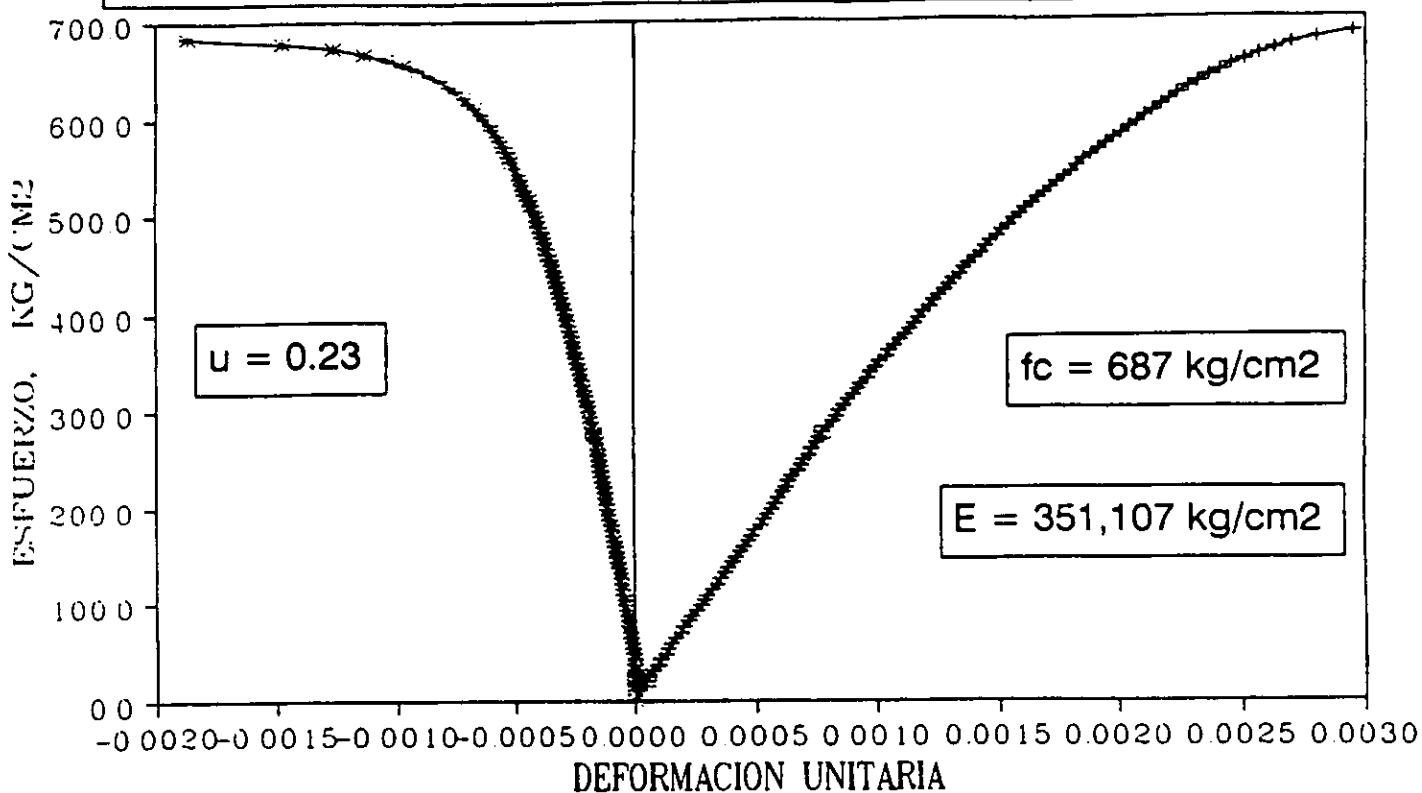


FIGURA 20B : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA E, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

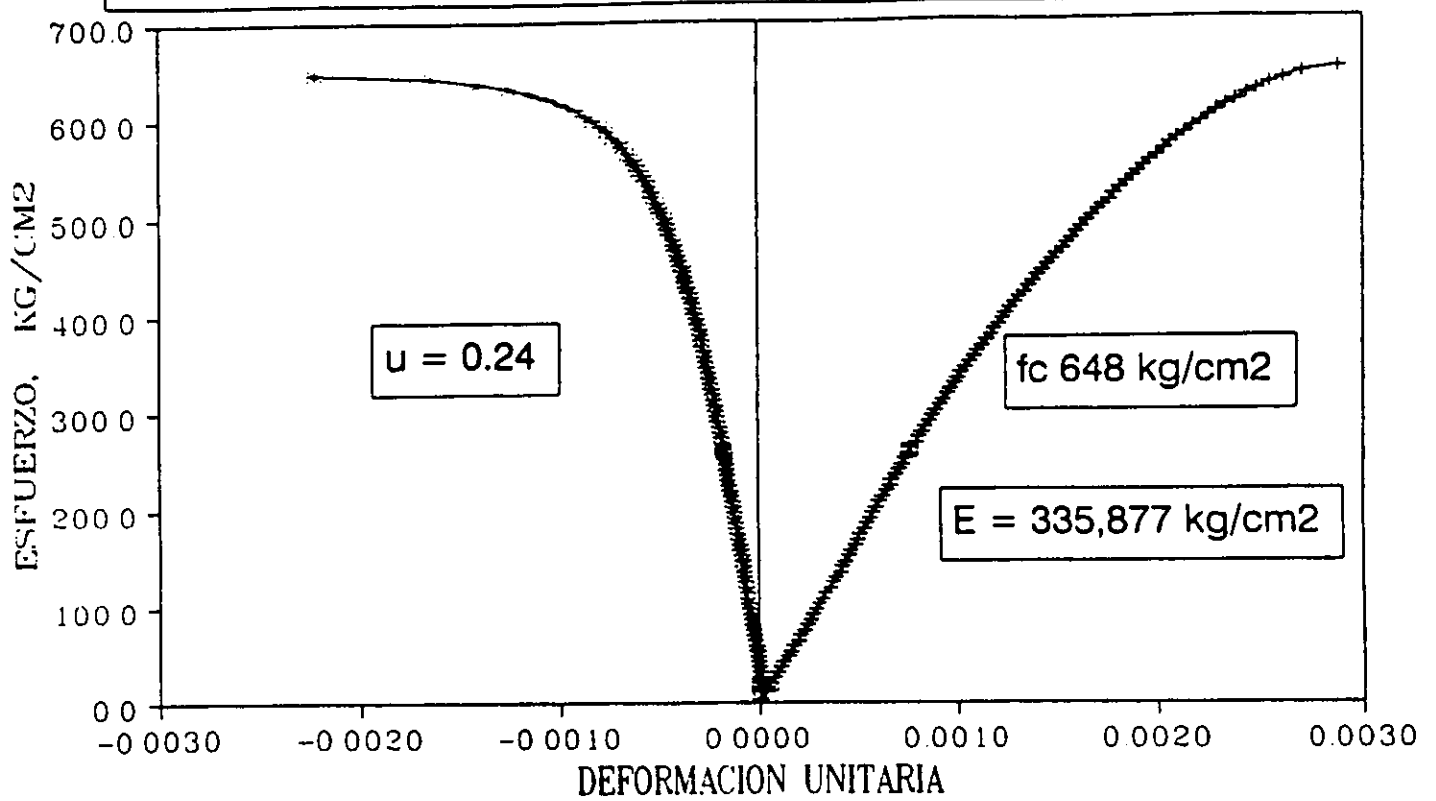


FIGURA 20C : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA E, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

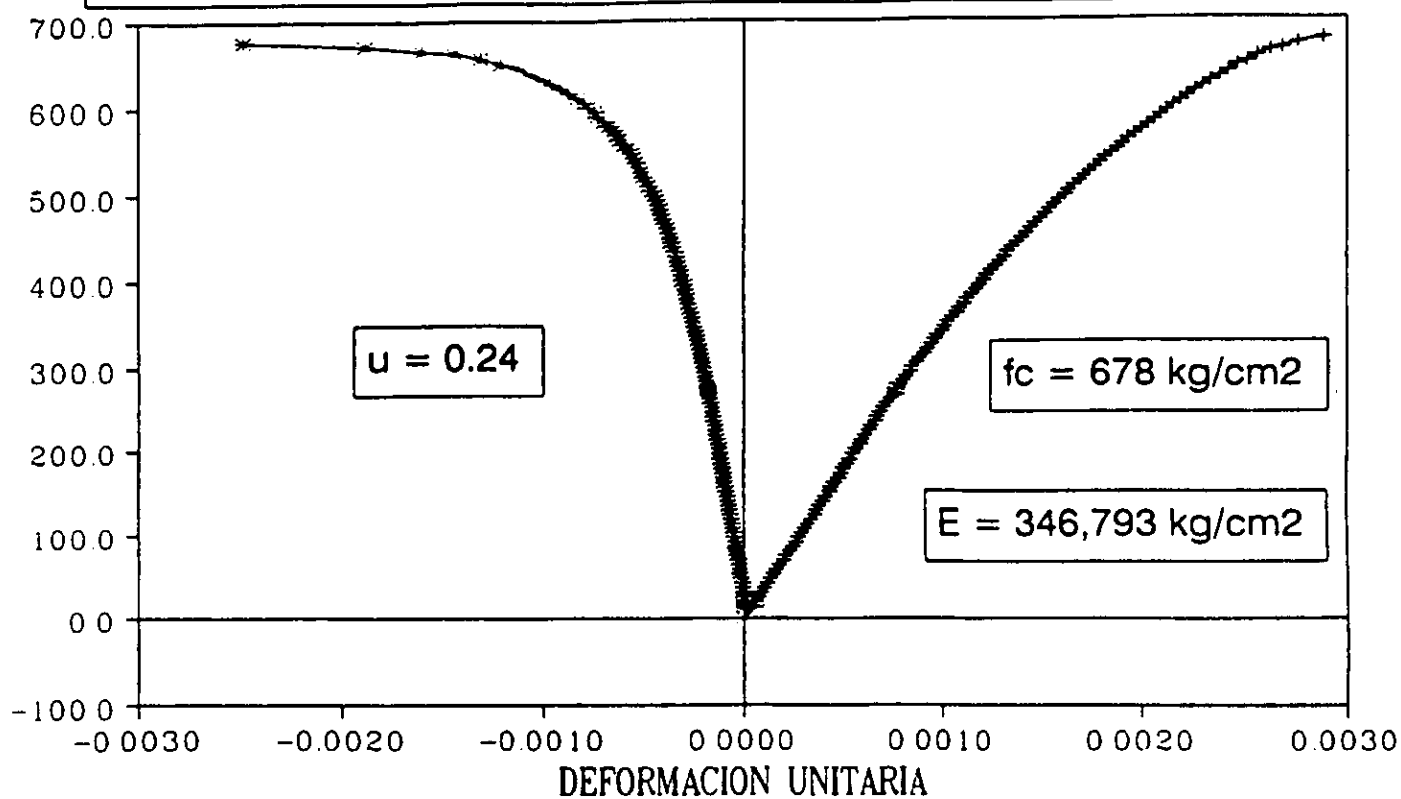


FIGURA 21A : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA F, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

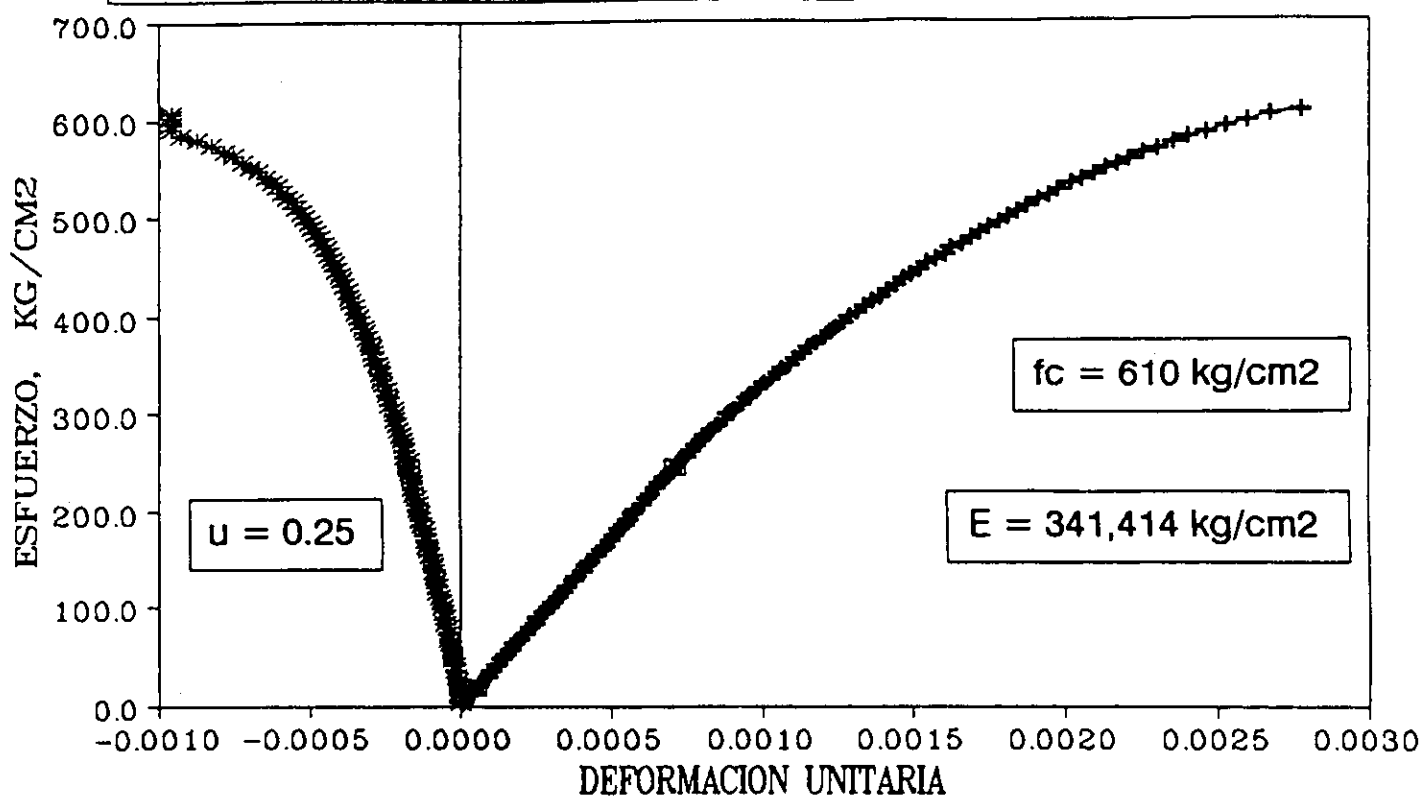


FIGURA 21B : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA F, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

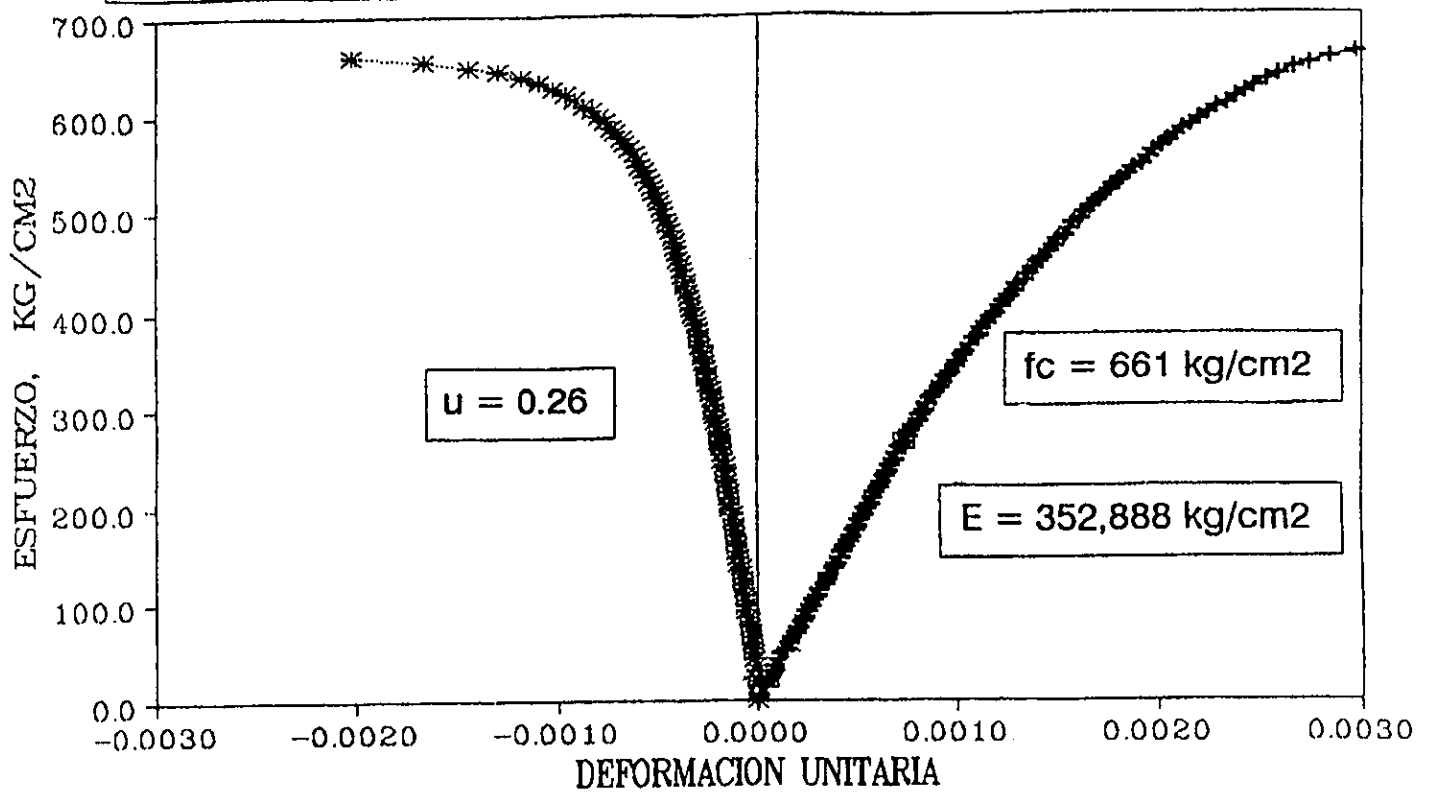


FIGURA 21C : RELACION ESFUERZO – DEFORMACION UNITARIA
MEZCLA F, 28 DIAS

MODULO DE ELASTICIDAD – R. POISSON

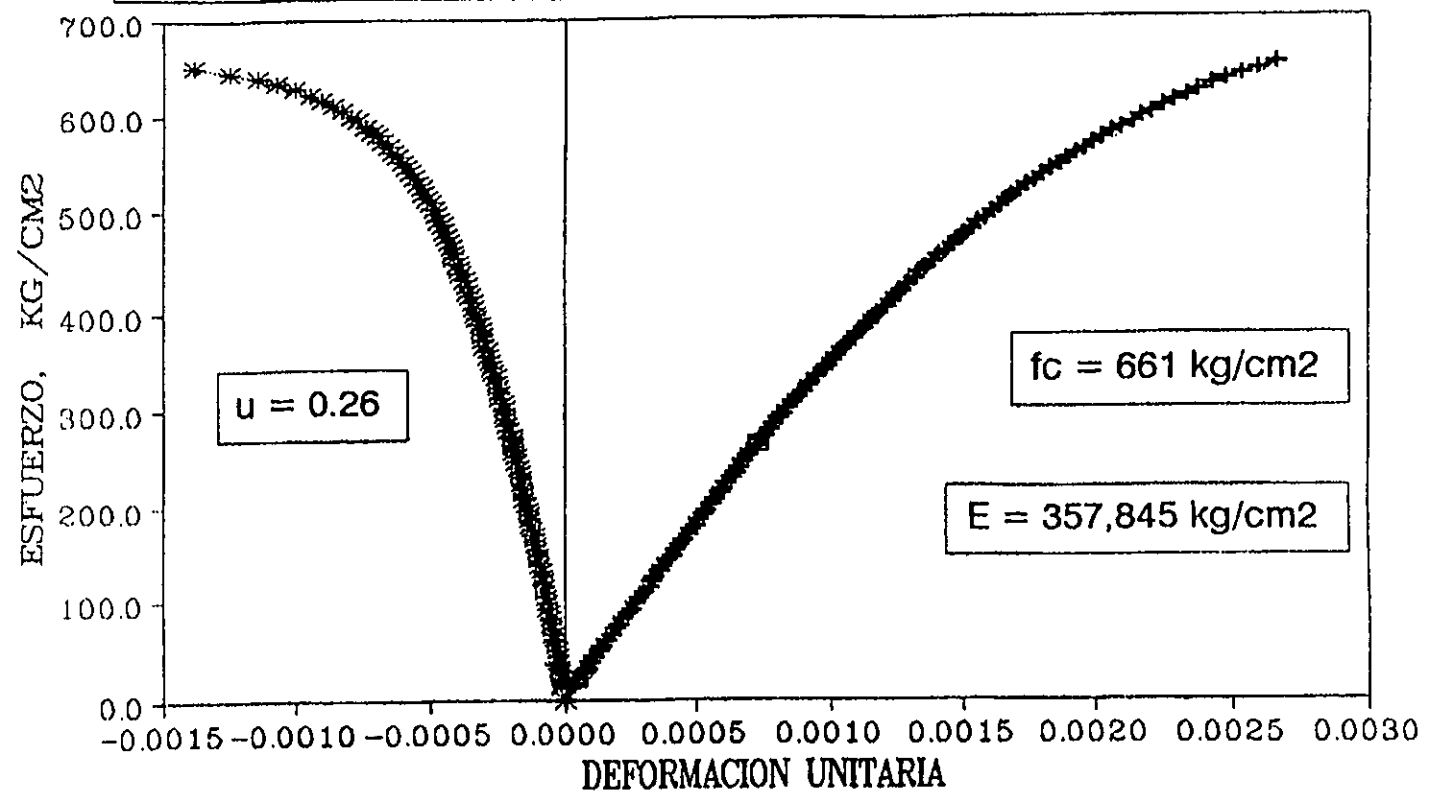


FIGURA 22 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

MEZCLA A

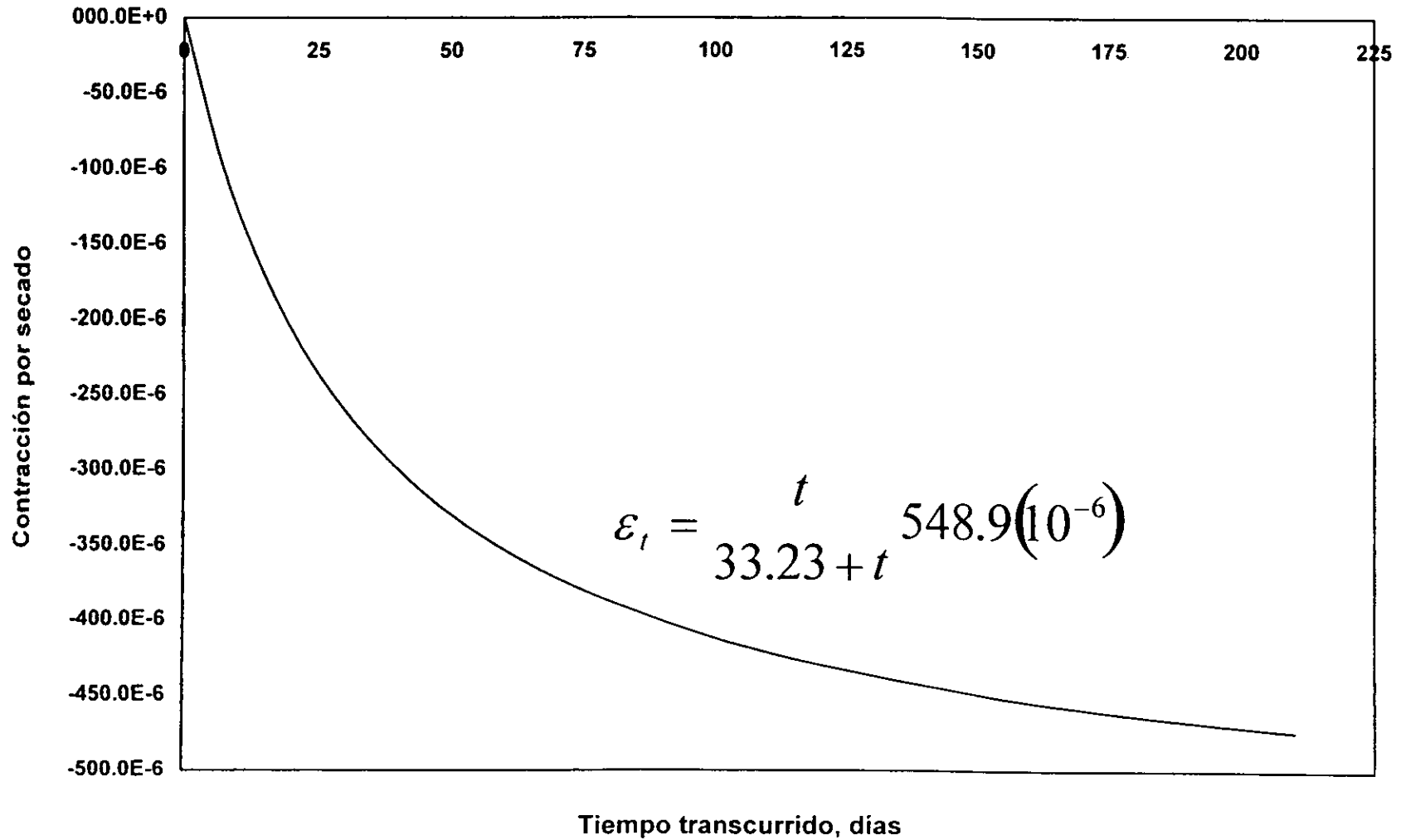


FIGURA 23 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

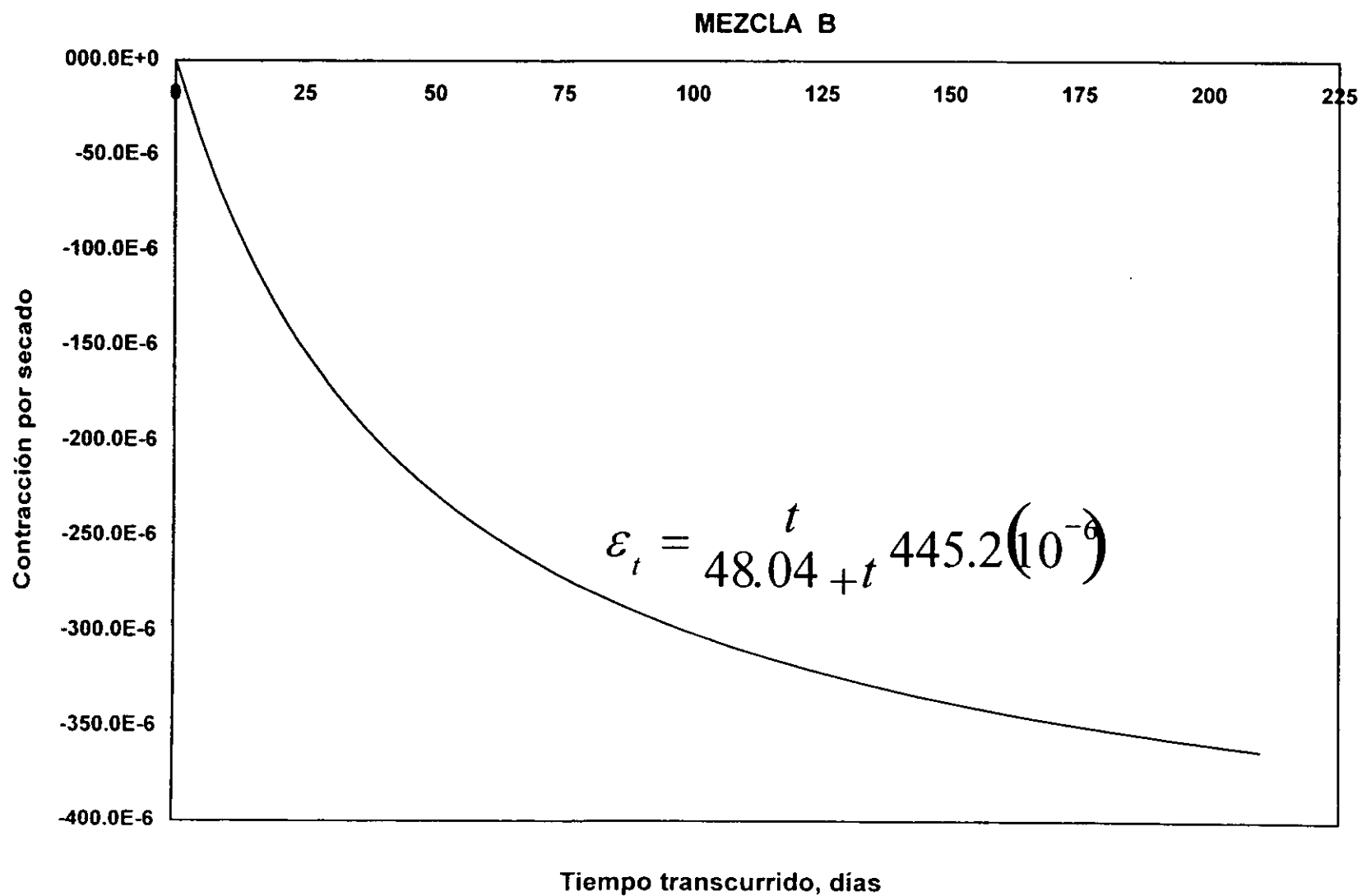


FIGURA 24 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

MEZCLA C

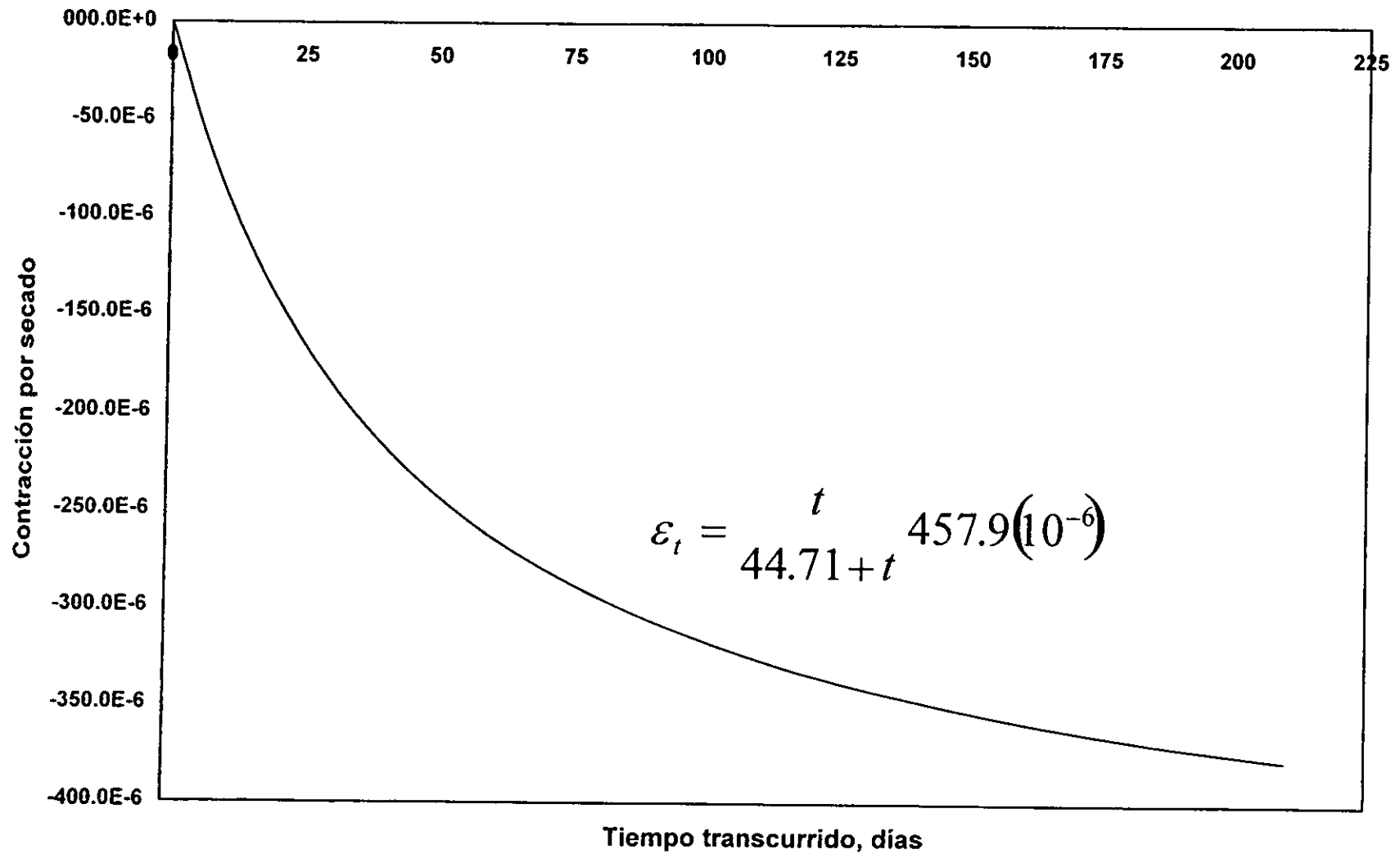


FIGURA 25 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

MEZCLA D

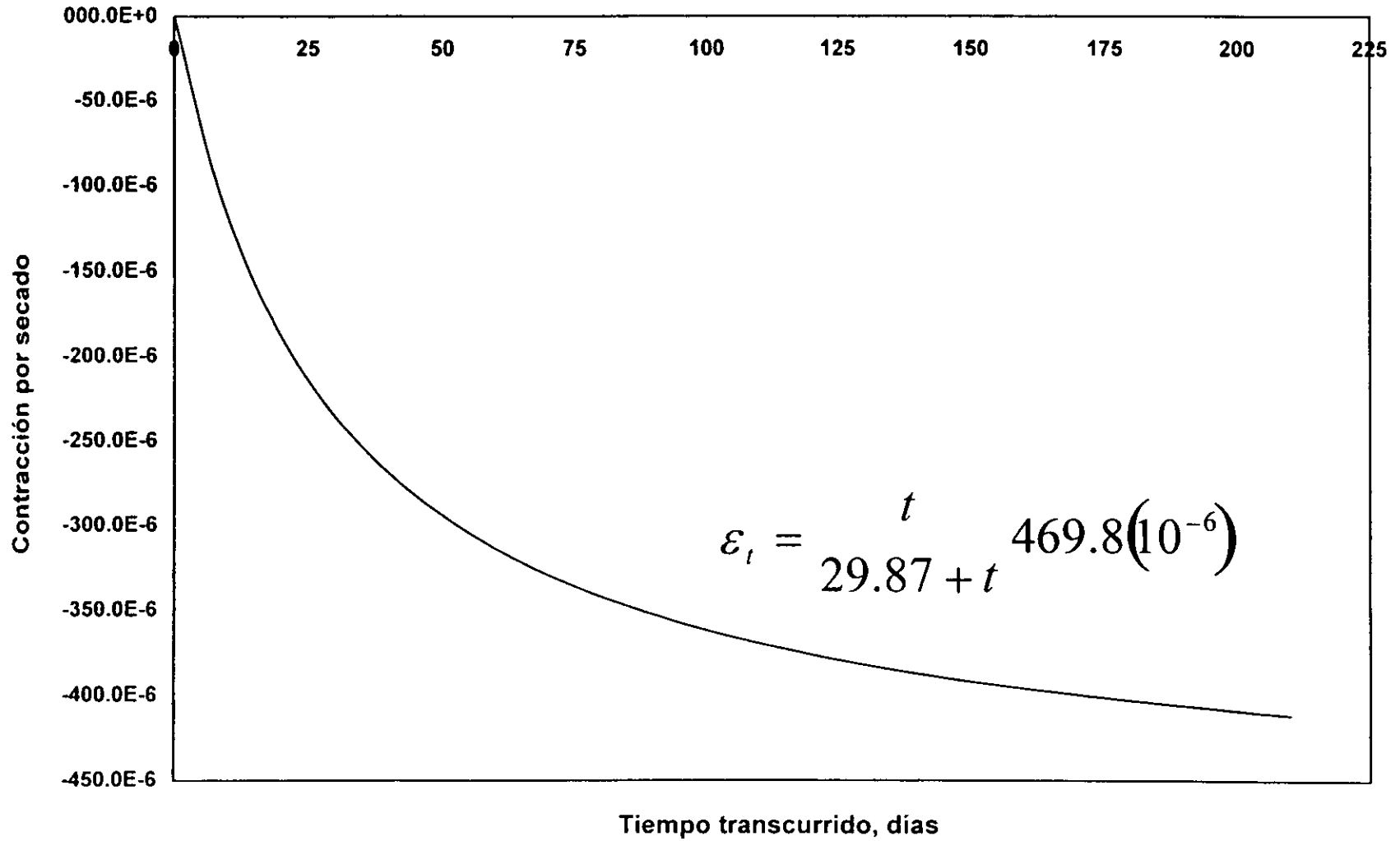


FIGURA 26 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

MEZCLA E

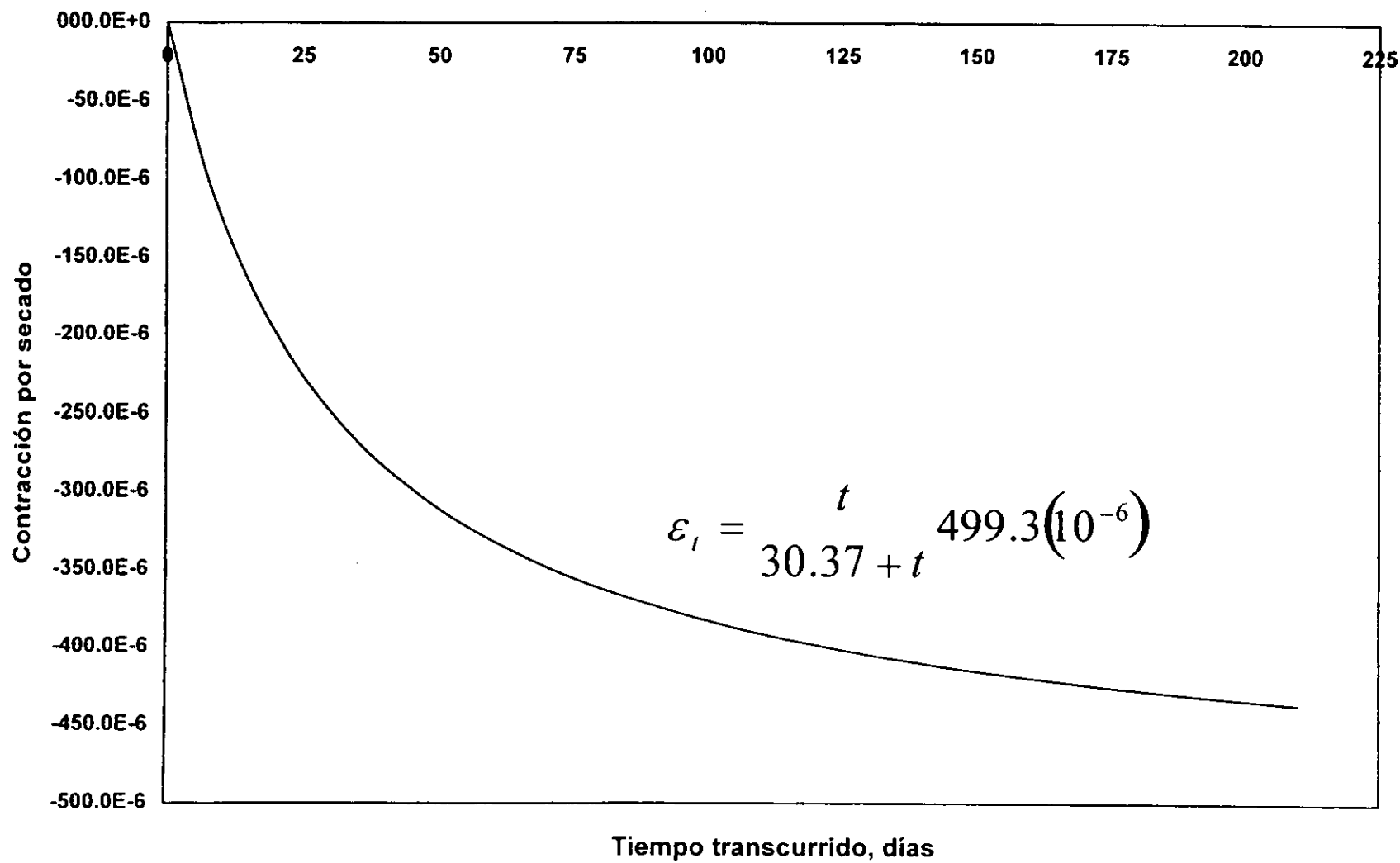


FIGURA 27 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL TIEMPO

MEZCLA F

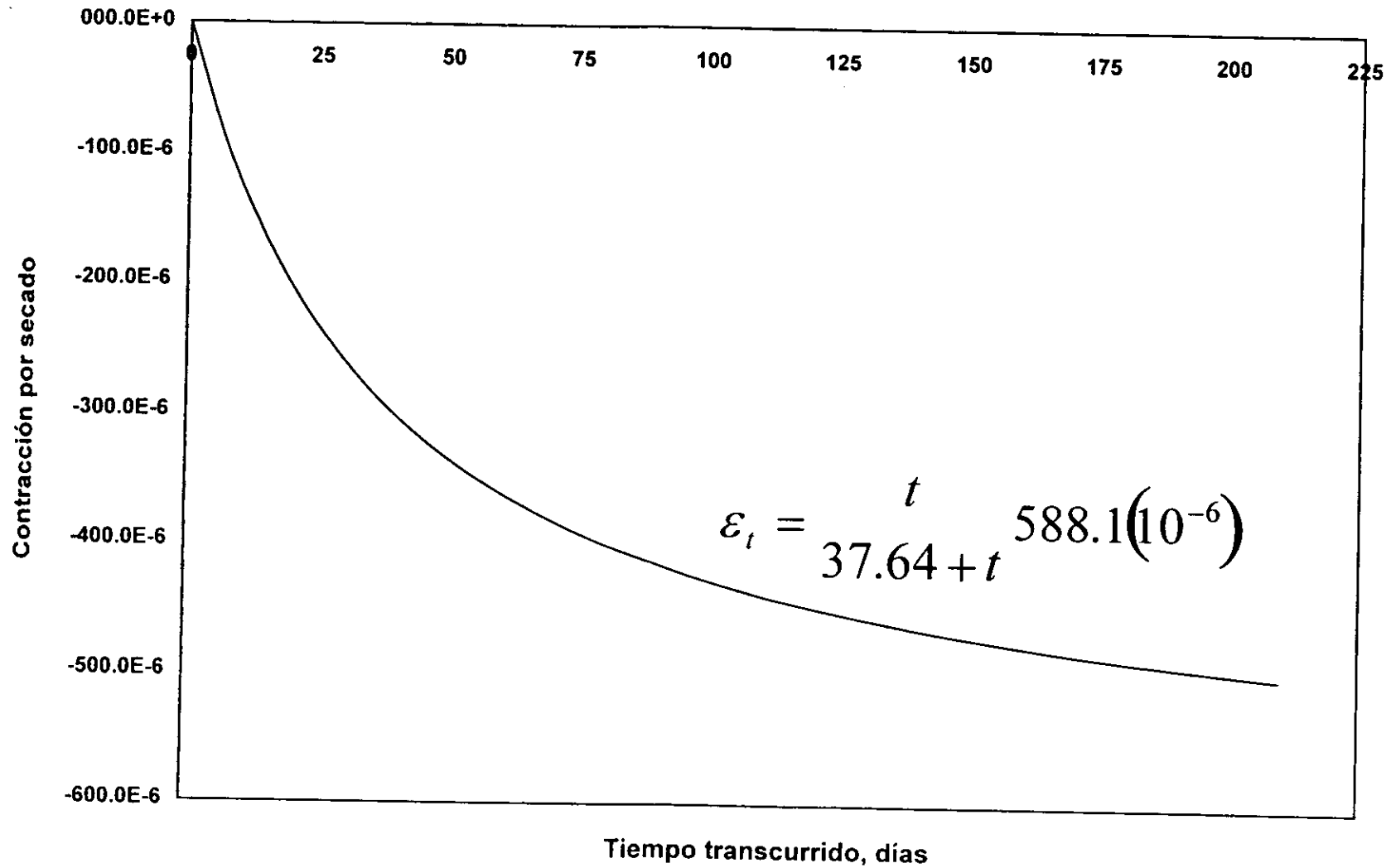


FIGURA 28 : VARIACION DE LA CONTRACCION POR SECADO CON EL CONSUMO DE CEMENTANTE

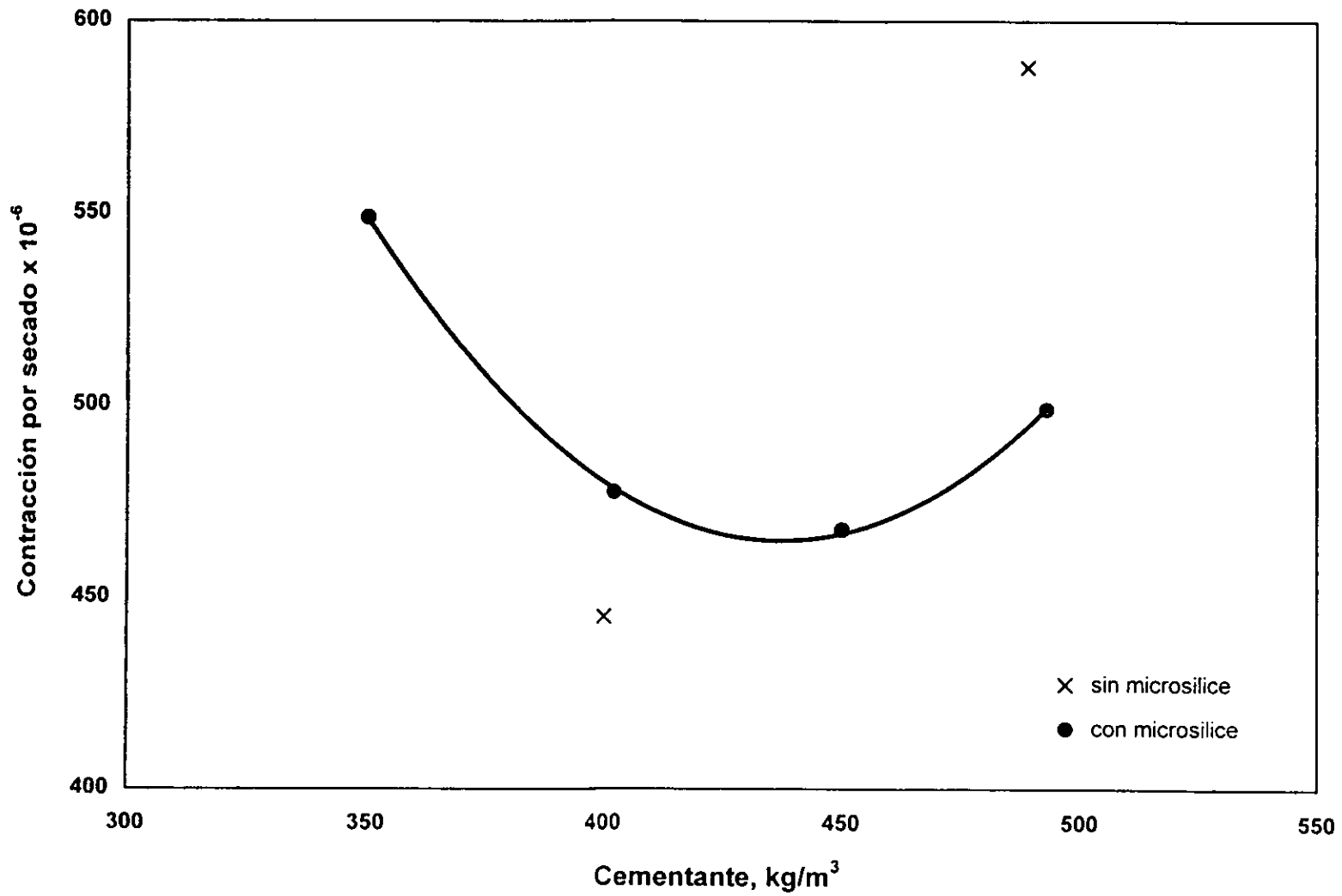


FIGURA 29 : VARIACION DEL COEFICIENTE DE DEFORMACION DIFERIDA CON EL TIEMPO
MEZCLA A

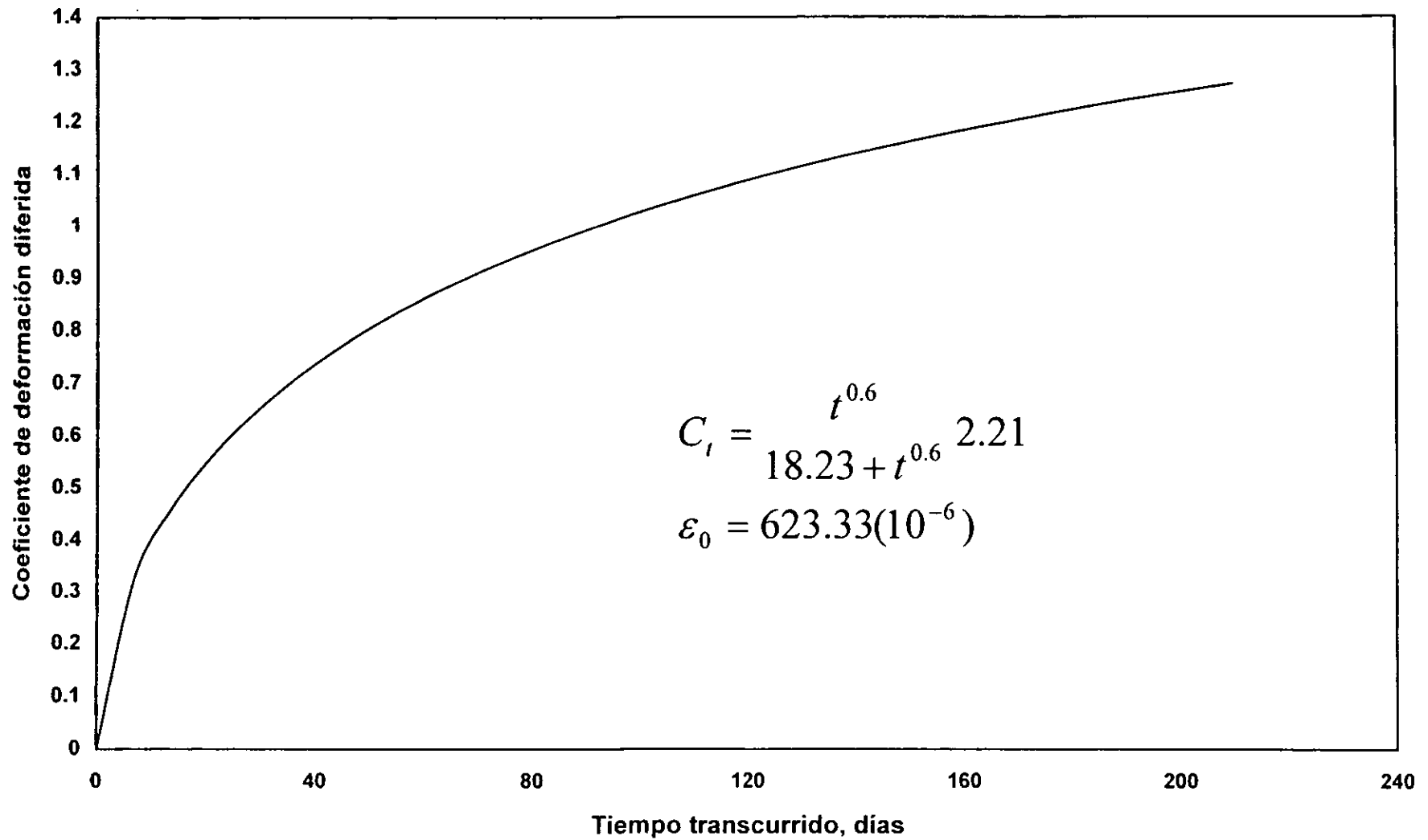


FIGURA 30 : VARIACION DEL COEFICIENTE DE DEFORMACION DIFERIDA CON EL TIEMPO
MEZCLA C

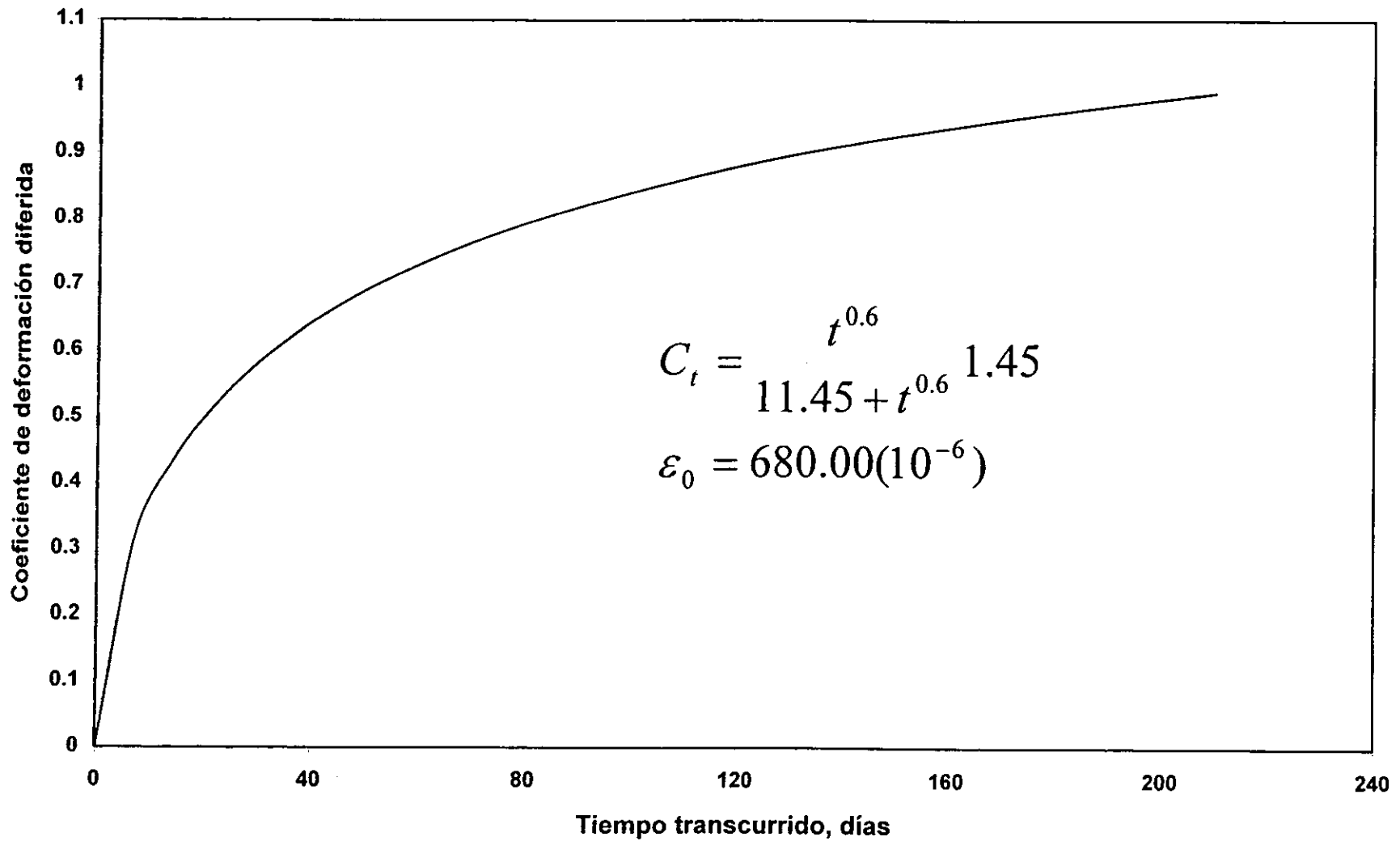


FIGURA 31 : VARIACION DEL COEFICIENTE DE DEFORMACION DIFERIDA CON EL TIEMPO
MEZCLA E

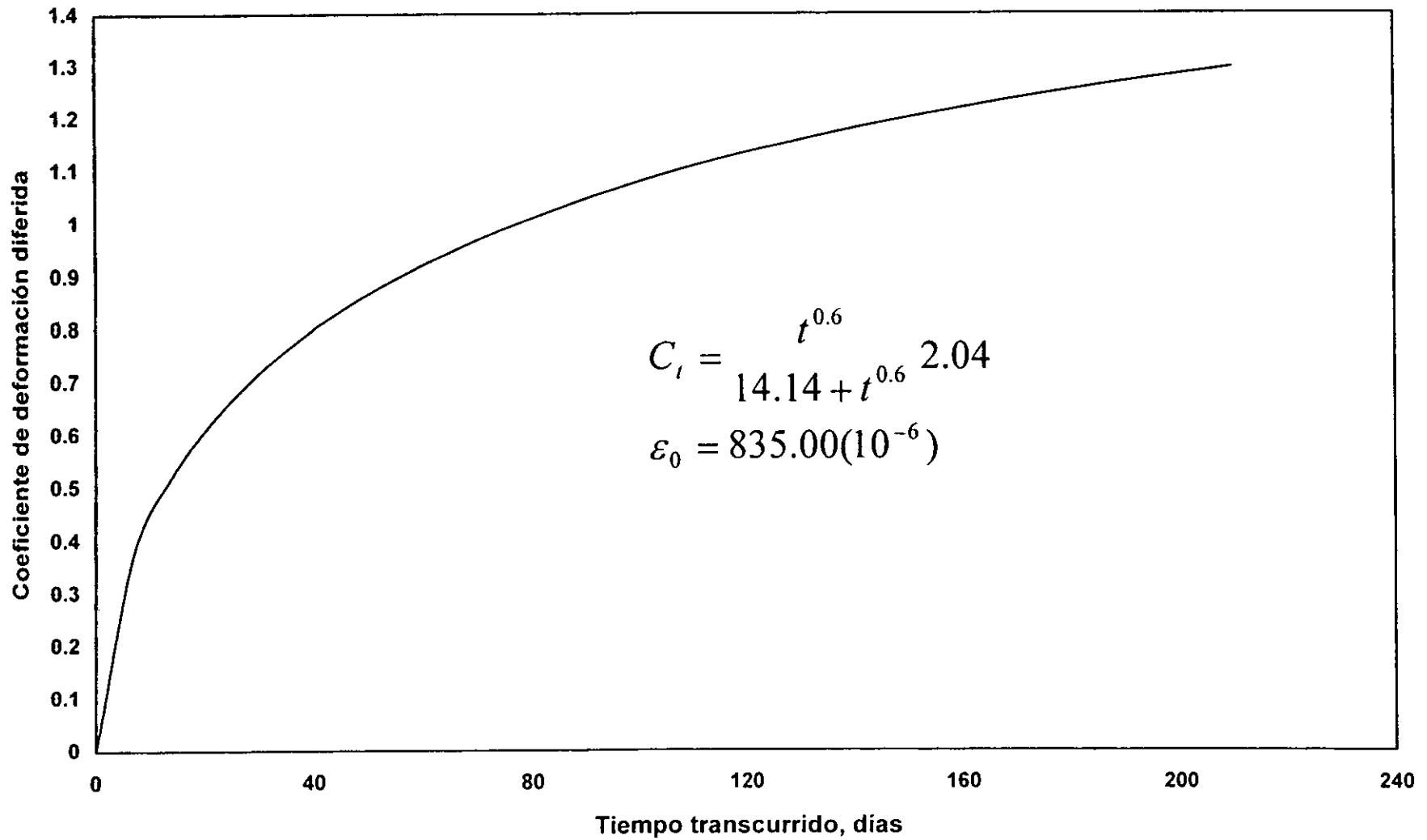


FIGURA 32 : VARIACION DEL COEFICIENTE DE DEFORMACION DIFERIDA CON EL CONSUMO DE CEMENTANTE

