



28
291

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA
Y GEODESICA

"METODO ACELERADO PARA VERIFICAR LA
RESISTENCIA MECANICA DEL CONCRETO".

T E S I S
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
CARLOS MAURILIO CARMONA FLORES



MEXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ABRIL 1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-109/95

Señor
CARLOS MAURILIO CARMONA FLORES
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

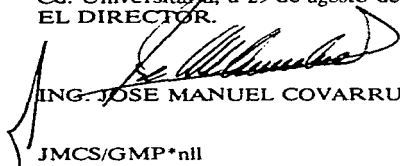
"METODO ACCELERADO PARA VERIFICAR LA RESISTENCIA MECANICA DEL CONCRETO"

- I. INTRODUCCION
- II. REVISION DE METODOS ACCELERADOS PARA VERIFICAR LA RESISTENCIA, VENTAJAS Y LIMITACIONES
- III. JUSTIFICACION TECNICA PARA EL EMPLEO DE ADITIVO ACCELERANTE
- IV. EQUIPO DE PRUEBA
- V. METODO DE PRUEBA
- VI. CALIBRACION DEL METODO DE PRUEBA
- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitario, a 29 de agosto de 1995.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*nl

A mis padres:

***Ing. José Carlos Carmona García y
María Guadalupe Flores Maldonado,
de quienes he recibido todo, sus esfuerzos y
sacrificios gracias a los cuales he podido
alcanzar mis objetivos.***

A mis Hermanos:

***Karla,
Marco Arturo, e
Ing. José Enrique,
con los que he compartido todo y en
quienes he visto siempre un apoyo.***

Quiero agradecer a:

- ***Instituto de Ingeniería de la UNAM y en particular al M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, quien sugirió y dirigió esta tesis, la asesoría, orientación y conocimientos recibidos en la ejecución de este trabajo, su seguimiento continuo durante todo el desarrollo experimental, así como la revisión minuciosa de la parte escrita; al Ing Manuel Mena Ferrer, quien propuso esta investigación, su colaboración y sugerencias en la revisión de este trabajo; al laboratorista Sr Francisco Reyes Morán y al Ing Alberto Fuentes González, su colaboración directa en el trabajo experimental, su experiencia, dedicación y apoyo, todo lo cual hizo posible la culminación de esta tesis.***

- ***Laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a su responsable directo M.I. Carlos Aire Untiveros por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.***

- ***Mi hermano José Enrique por el apoyo brindado a la familia y en especial para la realización de este trabajo.***

**"MÉTODO ACELERADO PARA VERIFICAR LA
RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO"**

ÍNDICE

	Pag
O. INTRODUCCIÓN	1
O.1 Antecedentes y objeto	1
O.2 Características del método evaluado	2
I. REVISIÓN DE MÉTODOS ACELERADOS PARA VERIFICAR LA RESISTENCIA, VENTAJAS Y LIMITACIONES	5
I.1 Métodos acelerados	5
A. Método del agua caliente	6
B. Método del agua hirviendo	8
C. Método del curado autógeno	10
D. Método de alta temperatura y presión	11
I.2 Ventajas y limitaciones de los métodos ASTM	13
II. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA PARA EL EMPLEO DE ADITIVO ACELERANTE	15
III. EQUIPO DE PRUEBA	18
III.1 Herramientas y/o equipo pequeño	19
III.2 Moldes para la fabricación de los especímenes	20
III.3 Recipiente o contenedor para el curado autógeno	20
IV. MÉTODO DE PRUEBA	25
IV.1 Obtención de la muestra de concreto para la elaboración de los especímenes de prueba	26
IV.2 Determinación de la cantidad de aditivo acelerante (cloruro de calcio) para su incorporación a la muestra de 12.5 litros de concreto	26

IV.3	Incorporación del cloruro de calcio a la muestra de concreto	29
IV.4	Moldeado de los especímenes de concreto	29
IV.5	Período de curado acelerado	29
IV.6	Ensayo de los especímenes de prueba	30
V.	CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA	31
V.1	Materiales seleccionados	32
	A. Agregados pétreos	32
	B. Cementos	33
V.2	Proceso de instrumentación	33
V.3	Mezclas elaboradas para la evaluación del método	36
	A. Primera etapa de la evaluación	36
	B. Segunda etapa de la evaluación	40
V.4	Análisis de resultados	41
VI.	CONCLUSIONES	46
VII.	BIBLIOGRAFÍA	50
	TABLAS	
	FIGURAS	
	APÉNDICE A	
	APÉNDICE B	

0. INTRODUCCIÓN

0.1 ANTECEDENTES Y OBJETO

En la construcción de estructuras de concreto y en general dentro de los procesos de producción y uso del concreto, es costumbre determinar su resistencia a compresión con el propósito de verificar el cumplimiento de los requisitos de resistencia especificados a la edad de proyecto, que de ordinario son 28 días. Sin embargo esta práctica ha demostrado ser ineficaz, por su extemporaneidad, para el desempeño de un adecuado control de la calidad del concreto, ya que muchas veces sus resultados no son útiles para la toma de medidas oportunas.

A fin de tratar de subsanar esta deficiencia, desde hace varias décadas se han desarrollado a nivel mundial numerosos procedimientos tendientes a obtener un rápido conocimiento de la resistencia del concreto que se utiliza, y con ello poder ejercer un control más oportuno de la producción. Así para hacer referencia específicamente a la práctica que prevalece en los Estados Unidos de Norteamérica (EUA), procede señalar que la American Society for Testing and Materials (ASTM) tiene actualmente normalizados cuatro procedimientos alternativos de esta índole, incluidos en el Método Estándar de Prueba ASTM C 684⁽¹⁾.

Conforme a estos procedimientos, lo que en esencia se pretende es acelerar la adquisición de resistencia del concreto en los especímenes de prueba, con el objeto de obtener un resultado anticipado de resistencia que permita estimar o predecir la resistencia que el concreto ensayado será capaz de alcanzar a la edad de proyecto. Esto implica que para el uso práctico de la información anticipada se requiere establecer previamente, de manera experimental, la relación que en cada caso existe entre la resistencia acelerada artificialmente y la resistencia que el concreto adquiere en condiciones normales a la edad de proyecto, que como se ha dicho suele ser de 28 días.

No obstante este requisito, los procedimientos para determinar anticipadamente la resistencia a compresión del concreto se utilizan con mucha frecuencia en EUA, dada la innegable utilidad que representan para el control de la calidad. En prueba de ello, el comité 214 del American Concrete Institute (ACI) dispuso desde 1981 la elaboración del Informe ACI 214.1R⁽²⁾, especialmente previsto para obtener, procesar y utilizar la información anticipada resultante de las pruebas de resistencia acelerada, obtenida mediante alguno de los procedimientos normalizados por la ASTM.

En lo que se refiere a la práctica en el medio local, cuando por la importancia de la obra se justifica complementar el control de calidad del concreto con pruebas de resistencia acelerada, suele acudir al empleo de la norma mexicana NMX C-290 del año 1980, en la cual se adoptaron los procedimientos A, B y C del método ASTM C 684, ya que no existe un procedimiento mexicano propiamente dicho. Tal vez con la intención de suplir esta carencia, el ingeniero M. Mena Ferrer propuso en 1995⁽³⁾ un procedimiento que contempla la inclusión de un aditivo acelerante y el uso de curado adiabático, como medios para acelerar la adquisición de resistencia mecánica en el concreto de los especímenes de prueba.

Con el propósito de evaluarlo, el Instituto de Ingeniería de la UNAM incluyó la comprobación experimental de este procedimiento entre sus proyectos de investigación para el desarrollo tecnológico. El proyecto se llevó a cabo bajo la dirección del ingeniero Carlos J. Mendoza E., subdirector del Instituto, y su ejecución estuvo a cargo del autor de la presente tesis para la obtención de la licenciatura de ingeniería civil, en la cual se describen todas las actividades realizadas y se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos en la evaluación de este procedimiento.

0.2 CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO EVALUADO

El procedimiento propuesto por el ingeniero Mena Ferrer para acelerar la adquisición de resistencia del concreto en los especímenes de prueba, se encuentra descrito en

el artículo citado como referencia 3. Este procedimiento tiene en común con los cuatro métodos ASTM, el hecho de que utiliza la elevación de la temperatura como medio para acelerar la hidratación del cemento y la consecuente resistencia del concreto. Asimismo coincide con el método C de la ASTM, de curado autógeno, en cuanto al aprovechamiento del calor de hidratación del cemento para provocar la elevación de temperatura en el concreto de los especímenes. Por el contrario, el procedimiento contempla dos principales peculiaridades que lo distinguen de los métodos ASTM:

- a) Se añade un aditivo acelerante a la muestra de concreto con que se elaboran los especímenes de prueba acelerada.
- b) Se emplean especímenes cúbicos, en vez de cilíndricos para determinar la resistencia acelerada.

En forma abreviada, el desarrollo del procedimiento es como sigue:

1. Se muestrea el concreto fresco de la manera usual y de esta muestra se extrae una porción de 12.5 litros ($1/80 \text{ m}^3$) de concreto, mediante el llenado de un recipiente con esta capacidad.
2. A partir del conocimiento 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 extraída, dividiéndolo entre 80.
3. Se vacía el volumen de 12.5 litros de concreto en una charola y se le adiciona 2 por ciento de cloruro de calcio anhidro con respecto a su contenido de cemento calculado, en masa.
4. Se remezcla manualmente la porción de concreto con el cloruro de calcio durante 2 minutos, con el objeto de homogeneizarla.
5. Con la porción de concreto homogeneizada se cuelan tres especímenes cúbicos de 15 cm, en moldes metálicos maquinados provistos de tapa, cuyas superficies interiores deben ser perfectamente planas y sus caras opuestas completamente paralelas.
6. Se introducen los moldes cúbicos llenos de concreto y tapados, en una caja aislada térmicamente, la cual debe cumplir con los requisitos de retención de calor establecidos en el método C de ASTM.

7. Al cabo de 24 horas de permanencia en la caja se extraen los moldes, se descimbran los especímenes cúbicos de concreto y se ensayan inmediatamente a compresión sin necesidad de "cabeceo" con azufre, con la sola precaución de aplicar las cargas en caras laterales opuestas que se obtuvieron por contacto con el molde.
8. Las resistencias aceleradas obtenidas a 24 horas, se utilizan con el mismo criterio de los métodos ASTM. Esto es, si se aplican a la predicción de la resistencia del concreto a la edad de proyecto, es necesario establecer experimentalmente la correlación que existe entre la resistencia acelerada a 24 horas (determinada en cubos) y la resistencia normal a 28 días (determinada en cilindros estándar). De otro modo, los resultados obtenidos en las pruebas aceleradas también pueden utilizarse directamente para evaluar la dispersión con que se está produciendo el concreto.

I. REVISIÓN DE MÉTODOS ACELERADOS PARA VERIFICAR LA RESISTENCIA, VENTAJAS Y LIMITACIONES.

I.1 MÉTODOS ACELERADOS

Actualmente la American Society for Testing and Materials (ASTM) establece dentro de la Norma C 684⁽¹⁾, cuatro métodos para fabricar, curar **aceleradamente** y probar a compresión el concreto en especímenes de prueba. El objetivo que se persigue en todos estos métodos es desarrollar de manera anticipada una porción significativa de la resistencia potencial del concreto. Los métodos son los siguientes:

- A. Método del agua caliente
- B. Método del agua hirviente
- C. Método del curado autógeno y
- D. Método de alta temperatura y presión

Es conveniente llevar a cabo una revisión de cada uno de los métodos anteriormente

citados, a fin de apreciar la forma en que se desarrollan, el equipo utilizado, el tipo de especímenes, los preparativos, los tiempos y procedimientos de ejecución, etc.

A. Método del agua caliente.

Este método pretende acelerar la obtención de resistencia mecánica de especímenes de concreto utilizando agua caliente con una temperatura de $35 \pm 3^{\circ}\text{C}$, a fin de que el agua caliente al rodear a los especímenes de concreto haga la función de un aislante que permita conservar el calor generado por la hidratación del cemento y con lo cual se obtenga un medio estable de curado de $35 \pm 3^{\circ}\text{C}$. El equipo y el procedimiento necesario para el desarrollo de este método se presenta a continuación:

Equipo requerido.

Los especímenes que se utilizan son cilindros estándar con dimensiones de 15 cm (6 pulg) de diámetro y 30 cm (12 pulg) de altura. Los moldes para la elaboración de dichos especímenes pueden ser de dos tipos: desechables o reusables, los cuales se encuentran normalizados en las prácticas ASTM C 470 y C 31, respectivamente.

En lo que respecta a los moldes desechables, éstos son utilizados en la forma convencional de acuerdo con las prácticas ASTM C 31 ó C 192.

Cuando se decide la utilización de moldes reusables en la aplicación de este método, se puede optar por dos variantes en cuanto a la forma de curado y a las características finales de los especímenes:

1. Se puede optar por elaborar los especímenes de la manera usual de acuerdo con la práctica ASTM C 31, es decir, el llenado del molde en posición vertical. Misma condición en la que permanece durante su período de curado, pero con el requerimiento final de cabecear el cilindro para su posterior ensaye.
2. La segunda opción plantea la elaboración de especímenes con la característica especial de prescindir del cabeceado final. Para ello el molde debe contar con tapas maquinadas las cuales puedan ser conectadas de manera segura a ambos extremos del molde cilíndrico. El llenado del molde se realiza en posición vertical para posteriormente permanecer en posición horizontal durante todo su período de curado. Las placas evitarán la pérdida de mortero durante el

curado; además sus características serán tales que: provean al espécimen superficies planas para su ensaye y garanticen tanto el paralelismo entre ambas caras del cilindro como su perpendicularidad con respecto al eje vertical.

Estas dos modalidades en las que se pueden utilizar los moldes reusables, pueden implicar ciertas variantes en el equipo a ser utilizado, por lo que es importante tenerlas presentes.

Dentro de los aparatos (o equipo) para aplicar este método se encuentra el "tanque de curado acelerado", que no es otra cosa sino un tanque para agua con características adecuadas tanto de dimensiones como de aditamentos especiales para alojar en su interior a los especímenes de concreto y someterlos a una temperatura específica. De hecho la configuración del tanque depende únicamente de la cantidad de especímenes a ser ensayados, pero se debe de cuidar que la distribución de los cilindros sea de tal manera que:

- a) La separación entre cilindros adyacentes sea de 100 mm mínimo (cara a cara).
- b) La separación entre la cara del cilindro y la pared del tanque sea de 50 mm mínimo.
- c) El nivel del agua debe ser de 100 mm por arriba de la parte más alta de los cilindros, por lo que quizá para controlar ese nivel sea conveniente que el tanque cuente con un rebosador.

De acuerdo con lo anterior el diseño del tanque debe de tomar en cuenta la posición en la que permanecerán los cilindros (vertical u horizontal). En la fig 1 se muestra el diseño de un tanque de curado acelerado propuesto para este método en la Norma ASTM C 684⁽¹⁾.

El tanque diseñado debe ser capaz de proveer al agua una temperatura específica, además de asegurar de que dicha temperatura se mantenga constante en cualquier punto del agua con una tolerancia de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Para cumplir con lo anterior es posible que el tanque tenga algún dispositivo de agitación mecánica y/o un material aislante térmico exterior.

Los cilindros son soportados por una placa que se encuentra colocada en el fondo del tanque de curado, la cual debe de contar con las suficientes perforaciones para permitir una fácil circulación del agua.

Para calentar el agua del tanque, el método sugiere el uso de calentadores de inmersión eléctricos, controlados por un termostato. Además de la utilización de un termómetro con el que se pueda verificar la temperatura.

Procedimiento.

El procedimiento inicia con la obtención de la muestra de concreto la cual se lleva a cabo de la manera usual, tal y como lo establece la práctica ASTM C 172. Cabe mencionar que la obtención del revenimiento, el contenido de aire y el moldeado de los especímenes se efectúan igualmente en forma convencional de acuerdo con la práctica ASTM C 31.

Inmediatamente después de que se han moldeado los especímenes, éstos se tapan a fin de evitar la pérdida de mortero cuando se encuentren inmersos en el agua, y una vez cumplido lo anterior los especímenes se colocan en el interior del tanque de curado. Previamente a la inmersión de los especímenes la temperatura del agua tiene que estar en $35 \pm 3^{\circ}\text{C}$, misma que se debe mantener durante todo el período de curado ($23\frac{1}{2}$ hr $\pm$ 30 min) con la salvedad de una posible disminución en la temperatura del agua de 3°C máximo, al momento de introducir los especímenes al tanque, la cual tendrá que recuperarse en un máximo de 15 minutos.

Los especímenes permanecen en el tanque durante el mencionado período de curado con un monitoreo continuo de la temperatura, para ser retirados y desmoldados posteriormente.

Finalmente en caso de que así se requiera los especímenes son cabeceados de acuerdo con la práctica ASTM C 617 y posteriormente son ensayados de la forma convencional (práctica ASTM C 39), pero a una edad de 24 hr $\pm$ 15 min.

B. Método del agua hirviendo.

Este método resulta muy parecido al método anterior por lo menos en cuanto a equipo se refiere, ya que los dos utilizan el agua como medio de calentamiento y por consiguiente requieren del uso de un tanque de curado.

Lo que pretende este método es propiciar un ambiente de curado a muy alta temperatura (con la ayuda del agua hirviendo), lo que origine que el espécimen lleve a cabo su proceso de hidratación con mucha mayor rapidez y como consecuencia un aceleramiento en la adquisición de su resistencia mecánica.

Equipo requerido.

El equipo necesario para desarrollar este método es prácticamente el mismo que se emplea en el método A:

- Los moldes que se utilizan, son para la elaboración de especímenes de 15x30 cm (6x12 pulg) reusables o desechables.
- El tanque de curado acelerado es el mismo, excepto que éste debe de estar forzosamente forrado por el exterior con un material aislante térmico; además requiere una tapa para su sellado y un tubo rebosador. Sin olvidar que los calentadores de inmersión eléctricos deben de tener la capacidad de elevar la temperatura del agua al punto de ebullición (fig 1).

Es evidente que un mismo tanque de curado puede ser utilizado tanto para el método A como para el método B siempre y cuando se tomen en cuenta las consideraciones antes mencionadas.

Por otro lado, debido a que el desarrollo de este método se lleva acabo utilizando agua hirviendo con una temperatura cercana a los 100°C, es evidente la necesidad de contar con equipo de seguridad para el operador: guantes, lentes, tenazas para el manipuleo de los especímenes, etc. (Nota.- La temperatura de ebullición del agua varía con la altura y presión atmosférica del lugar, y solamente es igual a 100°C al nivel del mar).

Procedimiento.

Como ya se mencionó anteriormente, todas las actividades que se efectúan hasta antes de iniciar el período de curado como lo son: la obtención de la muestra de concreto, la determinación del contenido de aire, el peso volumétrico, el moldeado de los especímenes, etc., son actividades que se llevan a cabo de la forma usual establecida en la práctica ASTM C 31, por lo tanto en la descripción de este método y en los sucesivos mencionaremos el procedimiento a partir de que los especímenes han sido moldeados.

Una vez que se tienen los especímenes perfectamente moldeados estos son tapados para evitar la pérdida de humedad, condición en la que permanecen almacenados durante 23 hr $\pm$ 15 min a una temperatura ambiente de 21 $\pm$ 6°C. Después de transcurrido este período inicial de curado, los moldes son introducidos en el tanque (con el agua en ebullición) donde permanecen durante 3½ hr $\pm$ 5 min, período que

podemos considerar como el de curado acelerado. Finalmente los moldes con los especímenes son retirados del tanque permitiéndoseles enfriar a la temperatura ambiente por no menos de una hora. Posteriormente los cilindros son cabeceados y ensayados a una edad de $28\frac{1}{2}$ hr $\pm$ 15 min.

C. Método del curado autógeno.

En este método los especímenes de concreto son confinados con un material aislante térmico a fin de impedir la pérdida de calor que va generando el espécimen en su proceso de hidratación. Por lo que este método también se conoce con el nombre de "método del curado adiabático".

Por lo anterior y de acuerdo a la forma en que este método funciona para acelerar el desarrollo de resistencia mecánica, podría ser comparado con el método del agua caliente, ya que en ambos casos lo que se pretende es que el calor generado por la hidratación del cemento sea retenido (con el auxilio de un medio externo) ocasionando un aumento en la temperatura de curado y consecuentemente en la resistencia del espécimen.

Equipo requerido.

Los moldes son los mismos que se utilizan en los métodos A y B para la elaboración de especímenes cilíndricos de 15x30 cm (6x12 pulg), excepto que los moldes reusables no son aceptados y únicamente se utilizan los moldes desechables.

Dentro del equipo que requiere este método se encuentra el recipiente o contenedor para el curado autógeno, el cual está construido de un material aislante térmico y en cuyo interior se alojan los moldes con los especímenes de concreto. También se requiere del uso de un termómetro de máxima y mínima, el cual se coloca en el interior del recipiente autógeno.

Basta decir que este recipiente de curado autógeno es la parte más importante y esencial del método para que quede plenamente justificada la existencia de toda una serie de requerimientos que garanticen su adecuado funcionamiento. Entre estos requerimientos se encuentran las pruebas de:

1. Retención del calor.
2. Hermeticidad entre las juntas a través de los sellos.

3. Estabilidad o firmeza del contenedor.

En la fig 2 se muestra un contenedor autógeno sugerido por el mismo método y que en la práctica ha demostrado ser exitoso. Sin embargo alguna variante o duda en la construcción del contenedor sea cual fuere esta, implicaría tener la certeza de que su funcionamiento es correcto, por lo que sería conveniente la verificación de cada uno de los requerimientos.

Procedimiento.

Inmediatamente después de que se moldean los especímenes (tiempo de moldeado alrededor de 15 minutos), se les coloca su tapa para que queden cerrados de manera hermética. Posteriormente cada uno de los moldes con los especímenes, se introduce dentro de una bolsa de polietileno la cual debe ser amarrada perfectamente teniendo la precaución de dejar la menor cantidad de aire atrapado. Finalmente y utilizando la bolsa como asidera, se introduce el ó los especímenes dentro del recipiente autógeno. Una vez que ha sido cerrado el contenedor, éste no debe de ser perturbado por al menos 12 horas; además debe de permanecer resguardado del sol a una temperatura de $21 \pm 6^{\circ}\text{C}$.

El tiempo total que permanecen los especímenes dentro del recipiente autógeno es de 48 hr $\pm$ 15 min, contados a partir de que los cilindros fueron moldeados; cumplido este tiempo de curado los especímenes se desmoldan y se dejan reposar a la temperatura ambiente alrededor de 30 minutos. Finalmente se cabecean y ensayan a una edad de 49 hr $\pm$ 15 min.

D. Método de alta temperatura y presión.

Este método resulta muy interesante debido a que prácticamente se aplican dos formas de incremento acelerado en un mismo método, ya que por una parte los especímenes se someten a alta temperatura y por otro lado se sujetan a alta presión. A continuación se describe el equipo y el procedimiento para la ejecución de este método, el cual quizá se pueda considerar como uno de los más complejos.

Equipo requerido.

Básicamente el equipo que requiere este método lo constituye un "aparato de curado", el cual consta de un sistema para dar carga a tres especímenes de concreto,

además de unos moldes especiales mediante los cuales se le transmite alta temperatura a dichos especímenes.

Mediante el sistema de carga se logra aplicar a los especímenes (dentro de los moldes y a través de sus caras extremas) una presión de $105.55 \pm 1.8 \text{ kg/cm}^2$, mientras que a través de los moldes la temperatura de los especímenes se eleva a $149 \pm 3^\circ\text{C}$. Para lo cual los moldes tienen las siguientes características:

- a) Sus dimensiones son para la fabricación de especímenes cilíndricos de $7.6 \times 15.2 \text{ cm}$ (3x6 pulg), es decir un diámetro de 76 mm y una altura de 152 mm.
- b) Son de acero inoxidable (de preferencia).
- c) El diseño del molde es de tal forma que permite la colocación de tapones de metal tanto en la parte superior como en su parte inferior. Estos tapones garantizan el sellado perfecto del espécimen, ya que a través de ellos es como se transmite la presión especificada.
- d) Tienen la capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de $149 \pm 3^\circ\text{C}$. Esta temperatura se alcanza en un tiempo de $30 \pm 5 \text{ min}$, y además se cuenta con un dispositivo para verificar la temperatura en el interior de los moldes.

En la fig 3 se presenta el diseño de un "aparato de curado" sugerido por el mismo método, donde se puede comprender de mejor manera el funcionamiento de éste.

Procedimiento.

Antes de describir el procedimiento a seguir es muy importante mencionar que este método de acuerdo al tamaño de los especímenes que utiliza, únicamente acepta concretos fabricados con tamaño máximo de agregado de 25 mm (1 pulg).

La forma de moldeado de los especímenes se lleva a cabo de acuerdo a la práctica ASTM C 31. Sin embargo debido al diseño especial del molde, se tienen ciertas variantes, es decir el llenado del molde se efectúa previa colocación del tapón de la base, para finalmente y de acuerdo a un enrasador especial (el cual dará la altura específica a los especímenes) colocar el tapón superior.

Al mismo tiempo que se moldean los especímenes (los tres), estos son apilados en forma vertical, de tal forma que el tapón superior de un espécimen sirve como el

tapón base de otro espécimen. Finalmente la columna de especímenes se coloca en el aparato de curado. Inmediatamente después se inicia con la fase de elevar la temperatura de los especímenes mediante el calentamiento de los moldes, al mismo tiempo que se inicia con la aplicación de la presión especificada.

Los especímenes son sometidos a la temperatura de $149 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante las primeras tres horas, mientras que la presión de $105.55 \pm 1.8 \text{ kg/cm}^2$ se mantiene durante todo el período de curado que es de $5 \text{ hr} \pm 5 \text{ min}$. De hecho la presión ejercida sobre los especímenes es una presión triaxial, ya que aunque la presión se aplica en forma directa por la parte superior e inferior del espécimen, se genera una presión indirecta en las paredes del espécimen como resultado del estado de confinamiento ejercido por el molde.

Finalmente los moldes son removidos del aparato de curado y se extraen los especímenes, mismos que se ensayan en un máximo de quince minutos después de que fueron desmoldados o bien en un mínimo de 30 minutos en caso de que sean cabeceados, aunque cabe mencionar que generalmente no se requiere del cabeceado ya que se obtienen superficies muy planas.

1.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS ASTM.

En la tabla 1 se resumen las principales características de cada uno de los métodos de curado acelerado descritos a lo largo del presente capítulo, y como se puede apreciar cada uno de ellos tiene ventajas y/o limitaciones, las cuales están directamente relacionadas con:

- a) el factor tiempo
- b) el factor económico
- c) la facilidad de ejecución
- d) la forma de operación
- e) las medidas de seguridad
- f) las condiciones del lugar, etc.

Para apreciar las ventajas y/o limitaciones más significativas de cada uno de los métodos se presenta un cuadro comparativo (tabla 2) con dicha información.

La consideración de los puntos anteriores, además de la experiencia son factores

decisivos para determinar el método adecuado para su aplicación en cada caso particular.

Es importante recalcar que los métodos únicamente proponen una forma de obtener la resistencia acelerada de especímenes de prueba y no establecen el nivel o porcentaje de resistencia potencial que se espera obtengan, ya que esta característica varía dependiendo del tipo y consumo de cemento, de la consistencia de la mezcla, del tipo de agregados pétreos utilizados, del empleo de aditivos, de la relación agua cemento, de la temperatura ambiente y del concreto, etc. Es por ello que, aunque el nivel de resistencia que se obtiene en cada método es una característica importante, no es decisiva en cuanto a su aplicabilidad, si bien lo deseable es que sea lo más alto posible; es decir, que la resistencia acelerada represente una proporción significativa de la de proyecto.

II. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA PARA EL EMPLEO DE ADITIVO ACELERANTE.

Anteriormente, al describir el nuevo procedimiento propuesto de curado acelerado, se mencionó el empleo de un aditivo acelerante de la hidratación del cemento como un elemento adicional para lograr el aceleramiento de la resistencia mecánica del concreto en los especímenes de prueba. También se mencionó al cloruro de calcio (CaCl_2) como el aditivo acelerante seleccionado.

La selección del cloruro de calcio obedece a que ha sido utilizado en el concreto desde hace más de 100 años, por lo que se cuenta con una gran cantidad de estudios e investigaciones referentes a su influencia sobre el concreto^(4,5). El cloruro de calcio es un aditivo acelerante que pertenece al grupo de las sales inorgánicas solubles de acuerdo a como lo establece el comité ACI 212⁽⁶⁾. En lo que respecta a su normalización, ésta se establece en la práctica ASTM D 98⁽⁷⁾.

En este capítulo se presentan los efectos previsibles del CaCl_2 anhidro sobre la mezcla de concreto, con lo cual se justifica plenamente el empleo de este aditivo para ser incluido en los especímenes de prueba. Es importante mencionar que la cantidad de cloruro de calcio (en peso) para su incorporación a una mezcla de concreto se define mediante un porcentaje del peso del cemento.

Cuando el cloruro de calcio se incorpora a la mezcla de concreto⁽⁵⁾, actúa sobre los componentes del cemento propiciando un aceleramiento en su hidratación, cuyo efecto inmediato es una disminución en el tiempo de fraguado, con lo cual la mezcla adquiere una pronta rigidización e inicia en forma temprana su endurecimiento. Este comportamiento ha sido determinado en pruebas realizadas en laboratorio (fig 4)⁽⁵⁾ sobre pastas de cemento y para distintos contenidos de CaCl_2 anhidro. En la misma figura se observa que la tendencia en cuanto a la capacidad de aceleramiento es mayor a medida que se incrementa el contenido de cloruro de calcio, sin embargo se presenta muy poca variación en los efectos para consumos de CaCl_2 anhidro entre 1.5 y 2.5 por ciento. Por lo cual de manera general se puede establecer que los resultados óptimos se obtienen para una dosis de CaCl_2 anhidro alrededor de un 2 por ciento.

A partir del momento en que la mezcla de concreto ha fraguado, los efectos del cloruro de calcio continúan con un aceleramiento en la adquisición de resistencia mecánica; sin embargo la velocidad con la que ésta se adquiere disminuye gradualmente conforme el tiempo avanza, es decir los efectos del cloruro de calcio únicamente se reflejan en un aumento en la resistencia mecánica del concreto en edad temprana, ya que a edades tardías los beneficios de resistencia son sensiblemente los mismos, tanto en mezclas elaboradas con CaCl_2 como en mezclas sin el empleo de este aditivo (fig 5)⁽⁵⁾.

Además de la edad del concreto, la temperatura de curado es otro factor que influye en cuanto al efecto del cloruro de calcio para acelerar la adquisición de resistencia mecánica del concreto. En la misma fig 5⁽⁵⁾ se puede observar que para un rango de temperaturas entre 5 y 25°C y para una edad del concreto de 24 horas, el porcentaje de incremento de resistencia a compresión obtenido de un concreto elaborado con CaCl_2 con respecto al mismo concreto sin el empleo de este aditivo, se mantiene sensiblemente constante del orden de un 80 por ciento, lo cual denota una importante eficiencia en cuanto al aceleramiento de resistencia mecánica originada por el cloruro de calcio.

Para el caso específico de la edad de 24 horas y sobre mezclas de mortero, se ha determinado en pruebas locales realizadas en laboratorio⁽⁸⁾ que la mayor resistencia a compresión corresponde a una cantidad de CaCl_2 anhidro equivalente a 1.5 por ciento del peso del cemento.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede esperar que la cantidad adecuada de CaCl_2 anhidro para los fines del presente trabajo, oscile aproximadamente entre 1.5 y 2.0 por ciento del peso del cemento, ya que cualquier porcentaje seleccionado dentro de este rango generará sensiblemente los mismos efectos sobre la mezcla de

concreto. Además se debe considerar que aún al seleccionar un determinado porcentaje de CaCl_2 anhidro para ser incorporado a la mezcla de concreto, éste variará debido a las diferencias normales entre el consumo de cemento supuesto y el consumo real.

La consecuencia más notoria de la adición del cloruro de calcio a una mezcla de concreto es el aumento inicial en la resistencia mecánica del concreto. Sin embargo, existe otra consecuencia originada por la rápida hidratación del cemento, la cual consiste en un incremento adicional en la velocidad de liberación de calor durante las primeras horas (fig 6)^(3,9), de modo que si este calor adicional se retiene, debe producirse mayor sobrelevación de temperatura en el concreto con cloruro de calcio en relación con el mismo concreto sin cloruro de calcio.

Por todo lo anterior se concluye que la adición del cloruro de calcio a la muestra de concreto para la elaboración de los especímenes de prueba y su posterior curado adiabático, repercutirá en un incremento de resistencia obtenido de dos diferentes maneras: la primera es la resistencia obtenida por las propias reacciones químicas inherentes a la hidratación del cemento y la segunda es la resistencia obtenida como resultado de aumentar la temperatura de curado debido al incremento en la velocidad de desarrollo de calor de hidratación durante las primeras horas.

III. EQUIPO DE PRUEBA.

Como se mencionó anteriormente, el método de prueba propuesto pretende, al igual que los métodos ya conocidos, fabricar, curar aceleradamente y ensayar a compresión el concreto en especímenes de prueba, a fin de alcanzar en un tiempo corto un alto porcentaje de la resistencia del concreto a la edad de proyecto.

Es evidente que, establecer un nuevo método de prueba implica la necesidad de establecer toda una normatividad en cuanto al equipo necesario, así como a la metodología requerida para su aplicación. Es por ello que en el presente capítulo se describe detalladamente el equipo de prueba.

Es conveniente tener presente la gran similitud que existe entre el método propuesto y el método C de la Norma ASTM C 684⁽¹⁾, ya que ambos están fundamentados bajo el mismo principio del curado adiabático, por lo que se puede esperar que gran parte del equipo sea semejante por lo menos en su esencia.

El equipo necesario para desarrollar el método de prueba propuesto se puede clasificar fundamentalmente en tres partes: la primera formada por las herramientas y/o equipo pequeño, la segunda constituida por los moldes para la fabricación de los especímenes y la tercera parte corresponde al recipiente o contenedor para el curado

autógeno.

III.1 HERRAMIENTAS Y/O EQUIPO PEQUEÑO.

Las herramientas y/o el equipo pequeño que se requiere, son los que se utilizan en la elaboración de concreto por los métodos convencionales, salvo algún equipo adicional originado por las exigencias del propio método. A continuación se presenta una lista de este equipo, que aunque en algunos puntos pudiera parecer trivial, es conveniente tenerla presente para facilitar la aplicación del método de prueba.

- Una balanza de laboratorio con una resolución de 0.1 gramo.
- Un recipiente cilíndrico para un volumen de 12.5 litros, con dimensiones de 252 mm (10 pulg) de diámetro por 252 mm (10 pulg) de altura.
- Una charola con dimensiones adecuadas para remezclar un volumen de concreto de 12.5 litros (dimensiones que probaron ser adecuadas y que podrían ser recomendables son: 570x700 mm de base por una altura de 100 mm).
- Un termómetro de máxima y mínima.
- Guantes de hule.
- Bolsas de polietileno de uso rudo (800x800 mm aproximadamente).
- Una varilla lisa con un diámetro de 16 mm (5/8 pulg) y un largo aproximado de 610 mm (24 pulg), donde por lo menos uno de los extremos tenga forma semiesférica.
- Espátula o cuña.
- Cucharón(es).
- Regla(s).
- Enrasador(es).

Finalmente se podría incluir dentro de esta lista, aquel equipo específico para la determinación de las propiedades más comunes del concreto fresco (peso

volumétrico, contenido de aire, revenimiento, etc.), el cual se encuentra normalizado en la práctica ASTM C 31. Aunque no son indispensables para la ejecución del método de prueba, son equipos usuales para el control del concreto en estado fresco.

III.2 MOLDES PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.

En lo que se refiere a los moldes, estos fueron diseñados para que en cada uno se pudieran fabricar tres especímenes cúbicos compañeros de 150 mm por lado. El hecho de utilizar especímenes cúbicos en vez de cilíndricos se debe fundamentalmente a que estos no requieren de la preparación de las superficies de carga al momento de ser ensayados, lo que elimina un factor adicional de variación en la determinación de la resistencia y reduce el tiempo de ensaye después del descimbrado. Las dimensiones propuestas de 15 cm por lado, obedecen a que mediante estas se logra tener un espécimen de dimensiones equiparables a las de un cilindro estándar de 15x30 cm, cuyo uso se encuentra fuertemente arraigado y reconocido por instituciones internacionales en la tecnología del concreto. Además, el uso de estos especímenes cúbicos ofrece un aumento aparente en la resistencia a compresión, en comparación con los especímenes cilíndricos⁽¹⁰⁾, lo cual resulta ventajoso para los fines previstos.

Por otra parte se estableció como una condicionante que los moldes fueran reusables, conformados por placas metálicas maquinadas, lo cual exigió tener un cuidado especial en el diseño del molde a fin de lograr la mayor hermeticidad posible del mismo, además de que su construcción garantizara que las caras opuestas de los especímenes fueran perfectamente planas y paralelas entre sí.

El molde que finalmente se fabricó y que a lo largo de todo su uso probó tener un funcionamiento adecuado se muestra en la fig 7. Asimismo se presentan los planos de taller para la construcción de un molde triple, donde se pueden apreciar las formas y dimensiones de cada una de las placas que lo componen (fig 8). El peso aproximado de este molde triple es de 33.5 kilogramos.

III.3 RECIPIENTE O CONTENEDOR PARA EL CURADO AUTÓGENO.

El recipiente o contenedor para el curado autógeno es quizá la parte más importante del equipo de prueba, debido a que es el que proporciona el medio propicio para llevar a cabo el curado acelerado de los especímenes de concreto. Este contenedor no es otra cosa sino una caja construida de un material aislante térmico en cuyo interior se

aloja el molde con los especímenes, a fin de que el calor generado por la hidratación del cemento sea retenido de manera adecuada.

Debido a la trascendental importancia del recipiente térmico y con el objetivo de garantizar su adecuado funcionamiento, se establecieron ciertos requerimientos a manera de normalizar las características de dicho contenedor. Estos requerimientos se establecen mediante las siguientes pruebas; conforme se especifica para el método C en la Norma ASTM C 684⁽¹⁾.

a) Prueba para verificar la retención de calor.

Esta prueba pretende verificar la capacidad que tiene el recipiente para retener calor, y la forma como se efectúa es la siguiente:

El molde para la elaboración de los especímenes de concreto se llena de agua a una temperatura de 82°C hasta un nivel máximo de 2.5 cm por abajo de la parte más alta del molde, y una vez realizado lo anterior se procede a colocarle su tapa e introducirlo en una bolsa de polietileno. Posteriormente el molde (con su bolsa) se coloca en el interior del recipiente térmico, el cual debe hallarse perfectamente cerrado. En esta condición permanece durante un tiempo de 72 horas a una temperatura ambiente de $21 \pm 1^\circ\text{C}$. La temperatura del agua a través del tiempo deberá descender de la siguiente manera:

Tiempo transcurrido	Temperatura del agua
12 horas	$67 \pm 3^\circ\text{C}$
24 horas	$58 \pm 3^\circ\text{C}$
48 horas	$45 \pm 3^\circ\text{C}$
72 horas	$38 \pm 4^\circ\text{C}$

Por lo tanto el descenso de temperatura deberá ser tal que se encuentre entre los límites permisibles (superior e inferior) representados en la fig 9.

b) Prueba para verificar la estabilidad y/o firmeza del recipiente.

Esta prueba consiste en someter al recipiente a dos condiciones extremas de temperatura (60 y -29°C) durante un lapso de 72 horas y determinar los efectos (daños o averías) que pudiesen causar al recipiente térmico.

c) Prueba para verificar la hermeticidad en las juntas del recipiente.

Para verificar la hermeticidad del recipiente térmico tapado, éste es sumergido en agua durante un tiempo de 5 minutos a una profundidad de 15 cm, la cual será medida desde la superficie del agua hasta la junta de sellado más próxima del recipiente; en estas condiciones no deberá escapar el aire del interior del recipiente a través de las juntas.

Por lo que toca al diseño del recipiente térmico, éste se hizo de tal manera que cuando el molde estuviera en su interior quedara la menor cantidad de espacio libre, es decir que quedara lo más justo posible.

Para fabricar el recipiente térmico se requirió de un material aislante rígido, además de un aislante flexible para usarse entre las partes separables del recipiente. El material seleccionado para la construcción del recipiente térmico debe ser tal que permita cumplir con las pruebas específicas anteriormente citadas, para lo cual es necesario que el material aislante se apegue en lo posible a las especificaciones técnicas mostradas en las tablas 3 y 4.

Finalmente se tomó la decisión de fabricar dos diferentes recipientes térmicos y verificar cuál se ajustaba mejor a los requerimientos establecidos.

El primer recipiente se construyó a base de placas de poliestireno extruido (material aislante que cumple con la Norma ASTM C 578), con un espesor en las paredes de 76 mm (3 pulg). El segundo recipiente se fabricó de poliuretano rígido espumado en sitio, con un espesor en las paredes de 102 mm (4 pulg). Cabe mencionar que los dos recipientes fueron contruidos con diferentes sistemas de sellado, a fin de determinar el diseño más adecuado. Además, en ambos recipientes térmicos se utilizó para las juntas de las partes separables una espuma de poliuretano flexible con espesor de 6 mm.

Cada uno de los recipientes fue forrado exterior e interiormente con fibracel de 3 mm de espesor, con el propósito de evitar daños o averías al material aislante durante su utilización.

En la fig 10 se muestra una parte del proceso de fabricación de los dos recipientes térmicos para el curado autógeno.

Una vez contruidos los dos recipientes térmicos, fueron sometidos a las pruebas especificadas para verificar su adecuado funcionamiento. A continuación se describe la manera en que se procedió para la ejecución de las pruebas y los resultados

obtenidos.

a) Prueba para verificar la retención del calor.

Para realizar esta prueba se requirió un equipo específico para monitorear continuamente el descenso de la temperatura del agua en el interior del molde. El equipo fue diseñado por investigadores del área de instrumentación del Instituto de Ingeniería (ver apéndice A). Se diseñó el equipo tanto para la verificación de esta prueba como para la evaluación del método de curado acelerado propuesto y cuyo desarrollo se explicará posteriormente. El equipo consta de lo siguiente:

- Sensores de temperatura con una resolución de 0.1°C , una precisión de $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$ y un rango de operación de 0 a 100°C .
- Un sistema o unidad adquisidora de temperatura de 8 canales.
- Un equipo de cómputo ordinario, con la característica básica de contar con un puerto serial para recibir la información procedente del sistema adquisidor.
- Un programa (software) para el registro y monitoreo de las temperaturas.

El equipo al que se hace mención se muestra en la fig 11.

La forma en que opera el equipo de monitoreo es la siguiente: cada uno de los sensores capta una señal que es transmitida a la unidad adquisidora y es ahí donde la señal es afectada por un determinado factor para que así se registre la temperatura correcta.

El factor correspondiente a cada uno de los sensores se obtiene mediante un proceso denominado de calibración, este proceso consiste en introducir los sensores dentro de una caja térmica en la cual se tiene instalado un termómetro de mercurio que indica la temperatura real existente, y es así como se logra determinar el factor requerido por cada uno de los sensores de tal forma que indiquen la temperatura correcta.

Para realizar la prueba de retención de calor se requirió del uso de tres sensores de temperatura adecuadamente calibrados; los sensores se colocaron en la parte central de cada uno de los compartimientos del molde triple (en el capítulo V se describe la forma en que se procedió para la colocación de los sensores), para llenarlo posteriormente de agua a 82°C y proseguir con el desarrollo de la prueba. Los

resultados obtenidos del monitoreo de temperatura para los dos recipientes térmicos se muestran en las figs 12 y 13. En ambas figuras se puede apreciar que los dos recipientes tuvieron un comportamiento satisfactorio, es decir dentro de los límites permisibles.

El recipiente construido de poliestireno extruido (fig 12) presentó una retención de calor ligeramente superior al construido de espuma de poliuretano (fig 13); seguramente esto fue consecuencia del tipo de sistema de sellado del contenedor.

b) Prueba para verificar la estabilidad y/o firmeza del recipiente.

En cuanto a la prueba de estabilidad y/o firmeza, ambos recipientes fueron sometidos a una temperatura de 60°C, sin que presentaran ni ablandamiento ni distorsión alguna.

c) Prueba para verificar la hermeticidad en las juntas del recipiente.

La prueba de hermeticidad se realizó con pequeños recipientes contruidos mediante una escala de reducción. Se obtuvieron resultados satisfactorios en los dos tipos de recipientes térmicos estudiados, es decir el de poliestireno y el de poliuretano.

Aunque los dos recipientes térmicos probaron ser igualmente eficientes, se tomó la decisión de utilizar el recipiente construido de poliestireno extruido para llevar a cabo la calibración del método de prueba. Este recipiente de curado autógeno se muestra en la fig 14.

El único motivo por el cual se eligió este recipiente podría ser justificado por el hecho de que presentó un comportamiento que se podría considerar como el más representativo de todos los posibles recipientes térmicos aceptables. El peso aproximado del recipiente de curado autógeno es de ocho kilogramos.

Finalmente en la fig 15 se presenta el molde junto con el recipiente de curado autógeno, donde se puede apreciar la forma en que finalmente quedan acoplados, las dimensiones, ranuras, separaciones, especificaciones, etc.

IV. MÉTODO DE PRUEBA

Tal como se dijo antes, proponer un nuevo método de prueba implica la necesidad de establecer de manera muy clara y precisa todo un proceso a seguir para cumplir con el objetivo para el cual fue creado, de tal forma que produzca resultados repetitivos independientemente de donde se aplique. No hay que olvidar que lo que se pretende es **NORMALIZAR** un "método acelerado para verificar la resistencia mecánica del concreto", por lo que el método debe contemplar desde la fabricación de los especímenes, pasando por el curado acelerado hasta llegar al ensaye a compresión del concreto en especímenes de prueba.

A continuación se hace una descripción paso a paso del desarrollo del método de prueba. Previamente, es conveniente mencionar que la obtención de la muestra de concreto hecha en el lugar de la obra, así como la determinación del revenimiento, peso volumétrico, contenido de aire, temperatura y demás propiedades del concreto fresco se realizan de la manera usual de acuerdo con las prácticas ASTM C 172 y C 31 respectivamente.

IV.1 OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE CONCRETO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA.

El método de prueba utiliza un molde con el cual se fabrican tres especímenes cúbicos compañeros, cuyo volumen total aproximado es de 10 litros.

La muestra de concreto para la elaboración de dichos especímenes de prueba se obtiene mediante el uso de un recipiente cilíndrico de 12.5 litros de capacidad, que aunque resulta tener un excedente de 2.5 litros, este volumen es necesario para cubrir las necesidades propias del desperdicio. Además resulta ser un volumen muy práctico en lo que al cálculo se refiere ya que este volumen representa un ochentavo de metro cúbico. En cuanto a la forma de obtener la muestra, esta se lleva a cabo llenando el recipiente en tres capas, cada una de ellas compactada con una varilla (25 penetraciones) en la forma usual. Finalmente se debe enrasar perfectamente a fin de obtener la cantidad exacta de 12.5 litros de concreto.

IV.2 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ADITIVO ACELERANTE (CLORURO DE CALCIO) PARA SU INCORPORACIÓN A LA MUESTRA DE 12.5 LITROS DE CONCRETO.

Tal y como lo establece el método de prueba propuesto, debe agregarse a la muestra de concreto una determinada cantidad de cloruro de calcio como aditivo acelerante de la hidratación del cemento.

Con base en lo expuesto en el capítulo II, se definió que la cantidad de cloruro de calcio anhidro conveniente para su incorporación a la muestra de concreto, se encontraba entre 1.5 y 2.0 por ciento del peso del cemento. En vista de que en la localidad es muy frecuente encontrar al cloruro de calcio con un 90 por ciento de concentración y por facilidad en el cálculo, se decidió utilizar durante la evaluación del método de prueba (capítulo V) 2.0 por ciento del peso del cemento de este producto. Lo que resulta ser equivalente a utilizar cloruro de calcio anhidro igual a 1.8 por ciento del peso del cemento.

Por lo que a fin de normalizar la cantidad de cloruro de calcio anhidro, siempre se deberá emplear 1.8 por ciento del peso del cemento, tal y como se establecerá más adelante.

Existen dos formas en las que se puede obtener comercialmente al cloruro de calcio:

- a) Químicamente puro, y
- b) Industrial.

El cloruro de calcio conveniente para ser incorporado a la muestra de concreto es el "industrial"; esto se debe a que tiene una ventaja económica con respecto al químicamente puro, además de que su obtención en el mercado resulta ser más fácil.

Dos tipos de cloruro de calcio industrial se encuentran especificados en la Norma ASTM D 98⁽⁷⁾: el tipo L (líquido) y el tipo S (sólido). El cloruro de calcio líquido se presenta en solución de agua. Mientras que el cloruro de calcio sólido, generalmente se presenta en cuatro diferentes clases⁽⁷⁾:

Clase A	Hojuelas,
Clase B	Esferas pequeñas,
Clase C	Granular, y
Clase D	Polvo.

El cloruro de calcio que se debe utilizar es el sólido (tipo S) y en polvo (clase D) con un doble propósito: primeramente facilitar la perfecta homogeneización con la muestra de concreto y en segundo para no alterar el contenido de agua en el caso de que se llegara a utilizar el cloruro de calcio líquido.

Por todo lo anterior, se debe emplear cloruro de calcio industrial en polvo, aunque cabe mencionar que este producto no es anhidro ya que existe en tres diferentes grados de pureza o de concentración⁽⁷⁾:

- Grado 1, con una concentración mínima del 77 por ciento, se produce generalmente en las clase A y B. Esto es una limitante, ya que no se encuentra en la presentación de polvo (clase D).
- Grado 2, con una concentración mínima del 90 por ciento, se produce en las cuatro clases A, B, C y D.
- Grado 3, con una concentración mínima del 94 por ciento, se produce en las cuatro clases A, B, C y D.

Lo más importante y lo que finalmente interesa es que a la muestra de 12.5 litros de

concreto se le incorpore un total de cloruro de calcio anhidro (100% puro) equivalente a 1.8 por ciento del peso del cemento. Para lo cual se procederá de la siguiente manera:

Primeramente se determina un porcentaje real, resultado de efectuar la siguiente operación: $(100/\text{grado de pureza}) \times 1.8$ [%]

Posteriormente se calcula la cantidad de cemento que contiene la muestra de 12.5 litros de concreto, esta cantidad se obtiene dividiendo entre 80 el consumo de cemento unitario (en peso) del proporcionamiento original de la mezcla de concreto. Finalmente a esta cantidad se le aplica el porcentaje real obtenido anteriormente, lo que da como resultado la cantidad de cloruro de calcio, en su presentación actual, que se debe añadir a la muestra de 12.5 litros de concreto.

Con el propósito de ser más claros en cuanto a la forma de determinar la cantidad de cloruro de calcio industrial en polvo que se debe añadir a la muestra de concreto, a continuación se presenta una ecuación general:

$$\text{CCIP} = ((100/\text{GP}) \times 1.8/100) \times (\text{CCU}/80)$$

donde:

CCIP	Cantidad de cloruro de calcio industrial en polvo que se debe agregar a la muestra de 12.5 litros de concreto (kg).
GP	Grado de pureza del cloruro de calcio industrial en polvo.
CCU	Consumo de cemento unitario del proporcionamiento original de la mezcla de concreto (kg/m^3).

La ecuación general es válida inclusive en el caso de que se utilice cloruro de calcio anhidro, es decir con un grado de pureza igual a 100. Lo que daría origen a la siguiente ecuación particular:

$$\text{CCIP} = (1.8/100) \times (\text{CCU}/80)$$

IV.3 INCORPORACIÓN DEL CLORURO DE CALCIO A LA MUESTRA DE CONCRETO.

La muestra de 12.5 litros de concreto contenida en el recipiente cilíndrico se vacía íntegramente en una charola de dimensiones adecuadas, se le agrega el cloruro de calcio previamente calculado y pesado con el auxilio de una balanza de laboratorio (balanza con resolución de 0.1 gramo).

Se efectúa un remezclado vigoroso durante dos minutos, tiempo suficiente para lograr una perfecta homogeneización. Este remezclado se debe efectuar con las manos protegidas con guantes de hule.

IV.4 MOLDEADO DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO.

Con la muestra de concreto perfectamente homogeneizada se procede a llenar cada uno de los tres espacios cúbicos de que consta el molde, el llenado se efectúa en dos capas, compactando cada una de ellas con una varilla (25 penetraciones) en la forma usual establecida en la práctica ASTM C 31 . Una vez que se tiene lleno el molde se enrasa perfectamente y se le coloca su tapa.

IV.5 PERÍODO DE CURADO ACELERADO.

Antes de que el molde sea introducido en el interior del recipiente de curado autógeno a fin de dar inicio al período de curado acelerado, es necesario colocarlo dentro de una bolsa de polietileno (de uso rudo) con el propósito de evitar una dispersión de humedad en el interior del recipiente de curado autógeno. Esta bolsa se debe amarrar perfectamente teniendo la precaución de dejar la menor cantidad de aire atrapado en su interior. Una vez hecho lo anterior, el molde se introduce en el recipiente de curado autógeno donde permanece perfectamente tapado durante todo el período de curado acelerado que es de 23 hr 50 min $\pm$ 10 min, contados a partir de que los especímenes fueron moldeados.

Es recomendable que dentro del recipiente de curado autógeno se coloque un termómetro de máxima y mínima, para que al final del período de curado se pueda observar el rango de temperaturas durante el período de curado.

Es importante que el recipiente de curado autógeno permanezca resguardado del sol y de las variaciones bruscas de temperatura; además no debe estar sujeto a vibraciones o sacudidas bruscas al menos durante las primeras 12 horas de curado. (Nota.- Conviene señalar que estas precauciones son obligadas con cualquier método de prueba, normal o acelerada, que se utilice).

IV.6 ENSAYE DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA.

Al final del período de curado, se extrae el molde del recipiente de curado autógeno y se procede a desmoldar los especímenes de prueba. Cada uno de los especímenes compañeros se ensaya en forma inmediata ($24 \text{ hr} \pm 10 \text{ min}$) sin necesidad de preparar las superficies de aplicación de carga. Estas superficies deben ser las que quedaron en contacto con las paredes laterales del molde, a fin de evitar utilizar la superficie de enrasamiento para la aplicación de la carga.

El tipo de falla de los especímenes debe ser de la misma forma característica ejemplificada en la norma ASTM C 39 para especímenes cilíndricos (forma cónica).

En la fig 16 se presenta una secuencia fotográfica donde se describe todo el proceso de aplicación del método de prueba propuesto.

V. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA

Para evaluar el método de prueba es necesario elaborar mezclas de concreto representativas de las comúnmente usadas en la fabricación de estructuras de concreto, para con ellas verificar las características propias del método de prueba propuesto, tales como:

- a) La capacidad del mismo para alcanzar niveles elevados de resistencia a edades tempranas.
- b) Las tendencias o comportamiento del método debido a la influencia de diferentes factores internos tales como: las variaciones en los tipos y consumos de cemento, en las relaciones agua/cemento, en el uso de aditivos, etc., y
- c) La sensibilidad del método a factores externos, tales como la temperatura ambiente y la del concreto.

V.1 MATERIALES SELECCIONADOS.

Para iniciar con la evaluación del método de prueba se debió seleccionar el tipo de materiales con que se trabajaría. La selección del tipo de agregados pétreos así como la de los tipos de cemento, estuvo basada en utilizar aquellos que fueran los más representativos de los empleados en concretos estructurales, aunque no fueran los de mayor consumo.

A. Agregados pétreos.

El tipo de agregados pétreos seleccionados fueron: arena andesítica y grava caliza de la localidad. Esto se debe a que, en los últimos diez años ha aumentado el uso de esta combinación de materiales en la elaboración de concretos, ya que han demostrado en forma general tener un comportamiento estructural satisfactorio⁽¹⁾.

Se realizaron las pruebas físicas a cada uno de los materiales pétreos, tales como: granulometría, absorción, densidad, pesos volumétricos, etc. Los resultados obtenidos en la ejecución de estas pruebas se presentan en las tablas 5 y 6, y en la fig 17.

Del estudio general realizado a los agregados pétreos se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) Las características de la arena andesítica resultaron ser adecuadas para la elaboración de las mezclas de concreto. Por lo tanto, la arena andesítica se utilizó sin modificación alguna, teniendo únicamente la precaución de considerar en el diseño de las mezclas la contaminación (o gravilla) contenida en la misma.
- 2) Debido a la falta de continuidad que presentó la grava caliza en su granulometría, ésta se tuvo que clasificar en diferentes tamaños mediante cribado. Lo anterior se realizó con el objetivo de controlar adecuadamente su curva granulométrica de tal manera que se apegara lo más posible a los límites permisibles establecidos en la norma ASTM C 33. Los tamaños en los que se clasificó la grava son los siguientes:

Grava 1-b → material que pasa la malla 3/4" y se retiene en la malla 3/8".
Grava 1-a → material que pasa la malla 3/8" y se retiene en la malla No.4.

La grava que finalmente se utilizó en la elaboración de todas las mezclas de concreto, fue la resultante de integrar el 60% de grava 1-b y el 40% de grava 1-a. Este ajuste granulométrico se muestra en la fig 18.

B. Cementos.

En cuanto a los tipos de cemento, se seleccionó un **cemento portland puzolánico** y un **cemento portland tipo I**. El primero se utilizó debido⁽⁴⁾ al gran incremento que ha tenido en los últimos 20 años la fabricación de cementos con puzolana, de hecho representan en la actualidad más del 50 por ciento de la producción nacional. Mientras que el segundo es un tipo de cemento que de mucho tiempo atrás ha servido como el adecuado para estandarizar cualquier estudio relacionado con el concreto. Además, el diferente calor de hidratación generado por estos cementos, permitiría conocer su efecto en los resultados de los ensayos acelerados efectuados por el método propuesto.

Con el propósito de verificar las características propias de cada tipo de cemento, se llevaron a cabo los análisis químicos y las pruebas físicas, incluyendo la determinación del calor de hidratación. Estos resultados se presentan en las tablas 7 a la 9.

V.2 PROCESO DE INSTRUMENTACIÓN

En cada una de las mezclas de concreto elaboradas en el proceso de evaluación se fabricaron los siguientes especímenes de prueba:

- a) Nueve especímenes cúbicos de 150 mm por lado, fabricados en los moldes que fueron descritos en el capítulo III. La distribución de estos especímenes se hizo de la siguiente manera:
 - a.1) Un molde para la fabricación de 3 especímenes cúbicos de concreto con cloruro de calcio, para curado adiabático y ensaye a 24 horas de acuerdo con el método propuesto.
 - a.2) Un molde para la fabricación de 3 especímenes cúbicos de concreto sin cloruro de calcio, curados al ambiente durante las primeras 24 horas y ensayados a esta edad para establecer correlaciones con respecto a los

especímenes curados aceleradamente durante el mismo lapso.

- a.3) Un molde para la fabricación de 3 especímenes cúbicos de concreto sin cloruro de calcio, curados de acuerdo a la práctica ASTM C 192 y ensayados a 28 días para establecer correlaciones con respecto a los especímenes cúbicos curados aceleradamente.
- b) Tres especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura de concreto sin cloruro de calcio, curados de acuerdo a la práctica ASTM C 192 para obtener la resistencia normal del concreto a 28 días y con los cuales se obtendrían correlaciones con respecto a los especímenes cúbicos curados aceleradamente.

Debido a que la eficacia del método propuesto depende de la adecuada retención del calor generado por la hidratación del cemento, resulta de evidente importancia verificar la manera en que dicho calor se desarrolla durante el proceso, tanto en el espécimen de concreto como en el ambiente interior del recipiente de curado autógeno. Además, es preciso conocer la temperatura del ambiente exterior bajo la cual se desarrolla el método de prueba.

El objetivo final de monitorear la temperatura durante todo el período de curado y obtener así el grado de madurez o hidratación que alcanzan los especímenes de prueba, es precisamente determinar si esta característica puede servir como un parámetro o índice que defina el comportamiento y eficiencia del método de prueba propuesto. Para cumplir con este objetivo, se utilizó un equipo específico mediante el cual se pudo llevar a cabo el monitoreo continuo de la temperatura tanto de los especímenes de concreto como del medio ambiente. El equipo específico al que se hace mención y la forma en que éste opera fueron descritos en el capítulo III.

El monitoreo de temperaturas se realizó para todas y cada una de las mezclas elaboradas en el proceso de evaluación, para lo cual antes de la realización de cada colado se efectuó la instrumentación requerida. A continuación se describe la forma en que ésta se llevó a cabo:

Los ocho canales de que consta el equipo de monitoreo para registrar la temperatura mediante el auxilio de los sensores específicos, se distribuyeron de la siguiente manera:

- Un sensor colocado en el ambiente del lugar de trabajo.
- Tres sensores colocados en el interior del molde que se sometería al curado

autógeno, para registrar la temperatura del concreto de los especímenes durante el período de curado acelerado.

- Tres sensores colocados en el interior del molde que permanecería expuesto al ambiente durante 24 horas para registrar la temperatura del concreto en estas condiciones.
- Un sensor colocado en el interior del recipiente de curado autógeno, es decir entre la pared externa del molde y la pared interna del recipiente de curado autógeno.

La parte más complicada del proceso de instrumentación, consistió básicamente en establecer la forma de colocar los sensores de temperatura en el interior de los moldes, a fin de que cuando se llenaran de concreto quedaran los sensores embebidos en la parte central de los especímenes. Para este efecto se procedió de la siguiente manera:

En cada una de las caras laterales opuestas del molde y en la parte correspondiente a cada uno de los tres especímenes se hicieron orificios de un diámetro de 1.6 mm (1/16 pulg); esto se hizo con el propósito de colocar un hilo de nylon de 0.25 mm de diámetro que atravesara de un lado a otro y el cual serviría para sujetar al sensor de temperatura en la parte central de cada espécimen de concreto. Cada sensor consta de tres terminales, y en cada una de ellas se conectó un cable de tan solo 0.8 mm (1/32 pulg) de diámetro; estos cables se condujeron del interior del molde hacia el exterior, a través de uno de los orificios del molde hasta llegar a conectarse a la unidad receptora o adquisidora de temperatura.

El diámetro del hilo de nylon (0.25 mm) así como el del cable (0.8 mm), fueron seleccionados con el propósito de que no intervinieran como un agente extraño que pudiese ocasionar alteración en la resistencia mecánica del espécimen.

Además, considerando que el sensor de temperatura quedaría permanentemente dentro del espécimen de concreto durante todo el período de curado y hasta el momento de su ensaye, se necesitó colocar un aislante (hule silicón) en cada una de las terminales del sensor para evitar que el agua contenida en la mezcla ocasionara corto circuito.

En la fig 19 se muestra parte del proceso de instrumentación efectuado previo a la realización de un colado.

V.3 MEZCLAS ELABORADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL MÉTODO.

Cumplidas las previsiones anteriores, se procedió a elaborar las mezclas para la evaluación del método de prueba. Este proceso de evaluación se desarrolló prácticamente en dos etapas.

En la primera etapa se elaboraron las mezclas de concreto con las cuales se determinaron las características básicas que definen el comportamiento del método de prueba propuesto bajo condiciones normales de temperatura, es decir en esta etapa se determinó el grado de eficiencia del método, sus alcances, sus tendencias, etc. En la segunda etapa se elaboraron mezclas con la finalidad de observar la susceptibilidad del método a la influencia de diferentes variantes ambientales.

En la primera etapa se elaboraron 16 mezclas de concreto dentro del laboratorio a una temperatura ambiente entre los 18 y 25°C, mientras que en la segunda etapa se elaboraron 5 mezclas de concreto bajo diferentes condiciones de intemperie, tales como lluvia, sol, frío, viento, etc.

A. Primera etapa de la evaluación.

Como se mencionó anteriormente, en esta primera etapa se elaboraron 16 mezclas de concreto de la siguiente manera:

Para cada tipo de cemento (el portland-puzolana y el portland tipo I) se diseñaron 8 mezclas de concreto, con un intervalo de resistencias entre 200 y 400 kg/cm²; este intervalo fue elegido debido a que se trata de resistencias empleadas muy frecuentemente en la construcción de estructuras de concreto.

De las 8 mezclas elaboradas con cada tipo de cemento, 4 de ellas fueron normales, es decir con los cuatro componentes básicos del concreto (cemento, agua, arena y grava). Mientras que las 4 restantes se elaboraron con un aditivo reductor de agua a base de lignosulfonatos. Esta clase de aditivo se utilizó debido a que^(4.5) la mayor parte de los concretos comercialmente producidos en México lo emplean y con el fin de conocer su posible influencia en el desarrollo de calor generado por el cemento junto con el cloruro de calcio.

1. Proporcionamiento de las mezclas.

Los proporcionamientos de las 16 mezclas de concreto de la primera etapa, fueron

diseñados^(12,13) para obtener revenimientos del orden de 8.5 ± 1.0 cm. En las tablas 10 y 11, se presentan los proporcionamientos de cada una de las mezclas junto con las propiedades del concreto fresco determinadas durante su fabricación, tales como el revenimiento, el peso volumétrico, el contenido de aire, etc.

2. Registros de temperaturas obtenidos durante las 24 horas del curado acelerado.

Como se indicó anteriormente se realizó un monitoreo de temperaturas en cada una de las mezclas de concreto elaboradas.

Con el propósito de ilustrar la forma en que se obtuvo la información a través del equipo de monitoreo, se presenta un fragmento (tabla 12) del registro de temperaturas de uno de los 16 colados realizados en el proceso de evaluación. A continuación se da una breve explicación de la información incluida en dicha tabla.

Inicialmente se indica el lapso de tiempo en que se realizó el monitoreo, el cual es de aproximadamente 24 horas. En seguida se indica el intervalo de registro que es de 4.98 minutos, es decir prácticamente se obtuvo una lectura de temperaturas por cada 5 minutos.

Posteriormente se presenta el registro de las temperaturas obtenidas a través de los ocho sensores y que corresponden a la siguiente información:

- En la columna S-1 se tiene el registro de la temperatura ambiente de trabajo.
- En las columnas S-2, S-3 y S-4 se tiene el registro de las temperaturas obtenidas por los tres sensores ubicados en los especímenes curados al ambiente.
- En la columna S-5 se tiene el registro de la temperatura en el interior del recipiente de curado autógeno, es decir la temperatura existente en el espacio entre el molde y la pared interna del recipiente de curado autógeno.
- En las columnas S-6, S-7 y S-8 se tiene el registro de los tres sensores ubicados en los especímenes sometidos al curado adiabático dentro del recipiente de curado autógeno.

En las columnas subsecuentes se presentan los datos procesados para la elaboración de la gráfica representativa del comportamiento de la temperatura a través del tiempo. Además, se presenta el grado de madurez o hidratación adquirido por el concreto, tanto de los especímenes curados adiabáticamente como de los especímenes curados

al ambiente en condiciones normales.

La construcción de las gráficas de variación de la temperatura, resultan importantes desde el punto de vista práctico debido a que permiten apreciar de mejor manera la efectividad del método de prueba. Las gráficas de temperatura correspondientes a los colados elaborados con cemento portland-puzolana se muestran en la fig 20. Posteriormente se presentan en la fig 21 las gráficas de temperatura de los colados elaborados con el cemento portland tipo I.

En la tabla 13 se muestra un resumen de las madureces adquiridas por los especímenes de concreto durante el período de aplicación del método de prueba propuesto. El análisis de estos resultados se hará posteriormente.

3. Resultados obtenidos del ensaye de los especímenes de prueba.

3.1 Resultados a 24 horas.

Al finalizar el período de curado acelerado, se llevó a cabo el ensaye de los especímenes de prueba a una edad de $24 \text{ hr} \pm 10 \text{ min}$. En las tablas 14 y 15 se presenta una relación de los resultados obtenidos en estos ensayos. En esta información se incluye lo siguiente:

- Las características y dimensiones de los especímenes.
- La carga directa y el esfuerzo a compresión al momento de la falla.
- La desviación estándar y los coeficientes de variación de las resistencias de los tres especímenes compañeros representativos de cada ensaye.
- El porcentaje de incremento de resistencia a compresión registrado en los especímenes curados aceleradamente con respecto a los que fueron curados normalmente al ambiente.

Del contenido de la información conviene destacar los valores de los coeficientes de variación obtenidos, los cuales indican una excelente uniformidad en la fabricación y ensaye de los especímenes de prueba.

En la fig 22 se puede observar la forma en que varía la resistencia obtenida en los especímenes curados aceleradamente con respecto a los que fueron curados en

condiciones normales. De hecho en esta figura se aprecia el efecto real producido en la resistencia del concreto a 24 horas como consecuencia de la aplicación del método de prueba propuesto.

3.2 Resultados a 28 días.

Los especímenes que fueron curados en forma estándar de acuerdo con la práctica ASTM C 192, fueron ensayados a los 28 días de edad obteniéndose los resultados mostrados en las tablas 16 y 17. La información en dichas tablas incluye:

- Las características y dimensiones de los especímenes.
- La carga directa y el esfuerzo a compresión al momento de la falla.
- La desviación estándar y los coeficientes de variación de las resistencias de los tres especímenes compañeros representativos de cada ensaye.
- El porcentaje de incremento de resistencia de los especímenes cúbicos con respecto a los cilíndricos.

Al igual que en los ensayos realizados a 24 horas, se obtuvieron coeficientes de variación excelentes, lo que permite tener suficiente confianza en los resultados de resistencia obtenidos.

En las figs 23 a la 26 se muestran gráficas representativas de la resistencia normal a la edad de proyecto (cilindros con curado estándar a 28 días) en función del consumo de cemento y de la relación agua-cemento, tanto para las mezclas elaboradas con cemento portland-puzolánico como para las mezclas elaboradas con cemento portland tipo I.

Además, en la fig 27 se puede advertir que los valores de resistencia a compresión obtenidos en especímenes cúbicos, aunque siempre son mayores que los obtenidos en especímenes cilíndricos, la magnitud del incremento no es constante, pues depende del nivel de resistencia alcanzado en la mezcla de concreto.

B. Segunda etapa de la evaluación.

En esta segunda etapa se elaboraron cinco mezclas de concreto bajo diferentes condiciones ambientales. Para ello, se seleccionó de entre los dieciséis diseños de mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación, un diseño cuya resistencia a compresión (cilindros curados a 28 días) fuera la más comúnmente usada en la construcción de estructuras de concreto. Se seleccionó la mezcla con designación C-16, elaborada con cemento tipo I y con una resistencia a la compresión igual a 275 kg/cm².

Finalmente lo que se pretendió fue comparar los resultados obtenidos en cada una de las 5 mezclas elaboradas en esta segunda etapa de evaluación, con respecto al comportamiento general del método de prueba previamente definido durante la primera etapa, a fin de verificar la forma en que pueden influir las condiciones ambientales en el comportamiento del método propuesto.

Las condiciones bajo las cuales se elaboraron las 5 mezclas de concreto fueron las siguientes:

- Una mezcla sometida a condiciones de intemperie bajo una temperatura promedio entre los 15 y 17.5°C. Temperatura natural de acuerdo a las condiciones ambientales.
- Dos mezclas a la intemperie bajo temperaturas variables debido a las diferentes condiciones ambientales, tales como: un período de sol directo, un período de lluvia, y un período de frío.
- Dos mezclas a una temperatura aproximada de 12°C. Condiciones producidas artificialmente para simular condiciones climáticas de invierno usuales en la localidad.

Para elaborar las dos últimas mezclas, se requirió de la ayuda de un sistema especial para lograr crear (dentro de un cuarto) un ambiente frío con el que se pudiera simular la temperatura de invierno. Además, se utilizó agua enfriada con hielo en la elaboración de las mezclas.

Todas las mezclas fueron repetitivas del colado C-16, por lo que sus proporcionamientos son los mismos, aunque con las variantes propias a la elaboración de una mezcla. En la tabla 18 se presentan dichos proporcionamientos, además de las propiedades del concreto fresco obtenidas durante su elaboración.

En la fig 28 se muestran las gráficas de variación de la temperatura, obtenidas a partir del equipo de monitoreo durante el período de curado acelerado. En ellas se puede observar de manera exacta las condiciones climáticas a las que se expuso el procedimiento del método de prueba, así como la forma en que influyeron estas condiciones durante el desarrollo de la prueba.

V.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para concluir el proceso de evaluación es necesario llevar a cabo un análisis riguroso de los resultados obtenidos de los ensayos. Mediante este análisis se definirán las características del método de prueba propuesto, las cuales permitirán establecer los alcances y/o limitaciones técnicas del propio método. A continuación se exponen los principales aspectos consecuentes de este análisis.

PRIMERO.

La característica más importante que permite establecer en gran medida la eficiencia del método de prueba, es la capacidad del procedimiento para obtener en un tiempo corto un elevado porcentaje de la resistencia potencial del concreto. Esta característica se puede determinar con base a lo expuesto en la tabla 19, en la cual se observa que para un mismo tipo de cemento la relación entre la resistencia acelerada a 24 horas (método propuesto) y la resistencia normal a 28 días (curado estándar) aumenta a medida que se incrementa el consumo de cemento. La tendencia en cuanto a este comportamiento se puede observar en la fig 29, donde se presentan dos "líneas de tendencia" representativas del comportamiento de cada tipo de cemento.

En la misma figura se puede observar que para consumos de cemento entre 230 y 380 kg/m³ el porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba se comporta de la siguiente manera:

- Para el cemento puzolánico el porcentaje varía desde un 60 hasta un 80 por ciento; cuyos porcentajes son bastante altos, además de que presentan poca diferencia para el rango tan grande de consumos de cemento.
- Para el cemento Tipo I los porcentajes tienen mayor variación, desde un 50 hasta un 90 por ciento. Sin embargo destacan sobremanera los porcentajes tan altos que se obtienen para concretos elaborados con grandes consumos de cemento.

De acuerdo a lo anterior las "líneas de tendencia" quedan definidas en función del consumo de cemento. Y de hecho éste parece ser el único parámetro que rige el comportamiento del método de prueba, ya que inclusive en mezclas con diferentes niveles de resistencia pero con el mismo consumo de cemento el comportamiento es el mismo (fig 30), lo cual denota que el uso de un aditivo reductor de agua no parece ejercer influencia en la capacidad del método para obtener un elevado porcentaje de la resistencia potencial.

Por lo que se puede establecer (con base en la fig 30) que a partir de una "línea de tendencia" definida para un determinado tipo de cemento, es posible generar una "familia de líneas de tendencia" con un comportamiento similar que representen a mezclas con mayor nivel de resistencia pero con el mismo consumo de cemento, obtenidas mediante una disminución en la relación agua/cemento, ya sea por el uso de un aditivo reductor de agua o inclusive a través de una variación en la consistencia (revenimiento) de las mezclas.

Las observaciones anteriores fueron hechas utilizando como base la resistencia a compresión normal (curado a 28 días) medida en especímenes cilíndricos, ya que estos especímenes son los convencionalmente utilizados en México. Sin embargo este análisis también se realizó considerando la resistencia a compresión a 28 días medida en especímenes cúbicos debido a que en algunos países europeos se acostumbra su utilización (figs 31 y 32), notándose un comportamiento similar al obtenido con cilindros.

SEGUNDO.

En la tabla 13 se muestran los valores de madurez obtenidos a 24 horas, tanto en especímenes curados al ambiente como en especímenes curados aceleradamente (método propuesto). De la información incluida en dicha tabla se construyen las gráficas mostradas en las figs 33 y 34. En la fig 33 se muestra una gráfica comparativa donde se puede observar el grado de madurez alcanzado por el concreto en función del consumo de cemento, tanto de los especímenes curados aceleradamente (24 horas) como de los especímenes curados en forma estándar (28 días). Mientras que en la fig 34 se muestra la relación entre la madurez adquirida por los especímenes en curado acelerado y su correspondiente resistencia a compresión.

Al analizar la información anterior y en especial la magnitud de los porcentajes de incremento de madurez (tabla 13) obtenidos como resultado de la aplicación del método de prueba, se observa que estos porcentajes de incremento tienen una tendencia bien definida, ya que son mayores conforme aumenta el consumo de cemento. Sin embargo estos incrementos en la madurez presentan una incongruencia

al tratar de relacionarlos con los resultados de resistencia a compresión obtenidos. Por lo que se puede establecer que el grado de madurez alcanzado por los especímenes en curado autógeno no refleja la verdadera ganancia de resistencia obtenida como resultado de la aplicación del método de prueba. Presumiblemente esto se debe a la aportación de resistencia acelerada que hace el cloruro de calcio como consecuencia de sus reacciones químicas con el cemento.

Por todo lo anterior se infiere que el concepto de madurez no es aplicable como medio de predicción de la resistencia del concreto cuando se emplea este procedimiento acelerado.

TERCERO.

A partir de los resultados obtenidos (de resistencia acelerada y resistencia normal de proyecto) se construye lo que podríamos denominar "curvas de predicción", estas curvas son indispensables, ya que serán las que finalmente se utilicen en campo para pronosticar o estimar la resistencia del concreto a la edad de proyecto.

El comité ACI 214 en su reporte 214.1R⁽²⁾ establece los criterios para hacer uso de las pruebas de resistencia acelerada. Este comité especifica una serie de requerimientos mediante los cuales se logra obtener una curva de predicción adecuada. Por ejemplo: para cada tipo de concreto la curva de predicción debe ser el resultado de correlacionar mínimo 30 mezclas, es decir 30 pares de datos de resistencia acelerada y resistencia normal; estas mezclas deben tener valores de resistencia con un cierto intervalo y amplitud de acuerdo a la resistencia promedio requerida.

El tipo de curva de predicción (línea de correlación) debe ser tal que correlacione de la mejor manera posible los valores de resistencia acelerada con los valores de resistencia normal de proyecto. Además, debe quedar definida mediante una expresión matemática.

De acuerdo a lo anterior se llevó a cabo un análisis de regresión y de correlación con los valores de resistencia de las 16 mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación. Aunque el número de muestras (mezclas) no es el adecuado, es pertinente realizar este análisis para establecer bajo que condiciones se debe obtener una curva de predicción, es decir mediante este análisis se podrá definir si es indispensable la construcción de una curva de predicción específica para mezclas con diferentes variables, como son el tipo de cemento y el uso de un aditivo reductor de agua.

Es conveniente recordar que el análisis de correlación es una herramienta estadística que permite determinar el grado de relación que existe entre variables, utilizando para ello dos medidas de asociación: el coeficiente de determinación r^2 y el coeficiente de correlación r .

El coeficiente de determinación r^2 mide la exactitud con la que una variable explica a la otra a través de la línea de correlación; cuando r^2 tiene un valor cercano a 1 nos indica una correlación muy exacta. Así, cuando r^2 es igual a 1 la correlación es perfecta de modo contrario cuando r^2 es igual a cero prácticamente no existe correlación. En lo que respecta al coeficiente de correlación r , este es una medida de asociación que se deriva del coeficiente de determinación y en un sentido práctico su comportamiento puede ser interpretado de manera semejante al de r^2 . De hecho la medida de asociación que se utiliza más comúnmente es el coeficiente de correlación r , quizá por su sencillez de expresión.

El análisis de correlación mencionado se presenta en las figs 35 y 36, en ellas se puede apreciar el tipo de muestras (mezclas) consideradas en la correlación, además de la ecuación de predicción y el valor del coeficiente de correlación r .

De lo observado en las figs 35 y 36 se deduce que la curva de predicción debe ser generada a partir de correlacionar mezclas con características bien definidas, es decir: con una sola combinación de materiales, un determinado tipo de cemento y considerando en su caso el uso de algún aditivo reductor de agua. Estas curvas de predicción serán tal como las mostradas en las figs 37 y 38, aunque cabe mencionar que estas curvas, en nuestro caso particular, se elaboraron con un número limitado de mezclas, ya que únicamente se utilizaron las mezclas de la primera etapa de evaluación.

CUARTO.

La influencia que tienen las condiciones ambientales (sol y frío) en el desempeño del método de prueba, queda de manifiesto mediante el análisis comparativo de resultados efectuado en la tabla 20 y fig 39. Se puede advertir que cuando se aplica el método de prueba bajo condiciones de alta y baja temperatura, el nivel de resistencia alcanzado en forma temprana sufre modificaciones considerables.

Al comparar los porcentajes de la resistencia normal (28 días) obtenidos como resultado de la aplicación del método de prueba, se observan las siguientes variaciones con respecto al colado C-16 (a temperatura intermedia, entre 18 y 25°C) en el que se obtuvo un valor de 50 por ciento.

- Para los colados elaborados a temperaturas bajas se obtuvieron valores de tan solo 40 por ciento.
- Para los colados elaborados a elevadas temperaturas se obtuvieron valores de casi 60 por ciento.

Lo anterior pone de manifiesto que las temperaturas extremosas constituyen un factor que condiciona el grado de eficiencia del método de prueba. Sin embargo esta característica (común a todos los métodos) no limita su uso, ya que bajo ciertas especificaciones y recomendaciones puede ser empleado aún en climas extremosos obteniéndose resultados satisfactorios.

De lo anterior se infiere que una vez obtenida la curva de predicción para un determinado tipo de concreto y bajo ciertas condiciones de temperatura, se deben de mantener las mismas condiciones (de temperatura) en aplicaciones futuras del procedimiento del método de prueba, ya que de lo contrario se obtendrán pronósticos de resistencia erróneos. Esta característica será analizada posteriormente dentro de las conclusiones.

VI. CONCLUSIONES.

1. El método evaluado se encontró accesible para su ejecución, pues no presentó dificultades fuera de lo común; de hecho ofrece las siguientes ventajas al usuario:
 - a) Permite obtener resultados en tan solo 24 horas, por lo que, tanto el inicio de la prueba como el final coinciden con los horarios normales de trabajo. Además, la prontitud con la que se obtienen estos resultados puede ser determinante en algunos casos.
 - b) No requiere ninguna fuente de energía externa para su ejecución, como por ejemplo la energía eléctrica, lo cual permite prescindir de una vigilancia continua y garantizar resultados confiables al no existir la posibilidad de una interrupción en el desarrollo de la prueba.
 - c) No requiere de la implementación de medidas de seguridad.
2. En cuanto al equipo requerido, se considera de importancia fundamental el cumplimiento de los requisitos establecidos para los moldes cúbicos y el

contenedor térmico. Debido a ello, se juzgó conveniente incluir en esta tesis la información necesaria para su adecuada fabricación, misma que en caso de requerirse puede resultar útil para la normalización del método. Con base a lo anterior cabe hacer las siguientes puntualizaciones:

- a) El recipiente térmico es de fácil construcción y a muy bajo costo. Además, su peso de aproximadamente 8 kilogramos y sus dimensiones permiten transportarlo sin mayor complejidad.
 - b) El molde triple probó ser absolutamente eficiente en cuanto a diseño y práctico en cuanto a su utilización, por lo que el cumplimiento de sus características se considera de suma importancia tal y como se indicó anteriormente. Sin embargo su peso (33.5 kg) puede ser susceptible de mejorarse, para lo cual se puede estudiar la posibilidad de disminuir el espesor de las placas o bien como alternativa la fabricación de moldes individuales.
3. Bajo condiciones ambientales con moderadas variaciones de temperatura, se obtuvieron resultados muy consistentes y confiables al correlacionar la resistencia acelerada a 24 horas y la resistencia normal del concreto a 28 días. Sin embargo, para ello es necesario establecer una correlación específica para cada tipo o clase de cemento y considerar en su caso el uso de algún aditivo reductor de agua.
4. En condiciones de baja y alta temperatura ambientales y del concreto, los resultados obtenidos se apartaron de la correlación de pronóstico previamente establecida a una temperatura intermedia entre 18 y 25°C (fig 40). Como sería de esperar, en baja temperatura la resistencia acelerada condujo a un pronóstico en defecto, y lo contrario en alta temperatura.
5. El comportamiento anterior, al cual no son ajenos otros métodos de curado acelerado, plantea la necesidad de dos precauciones:
- a) Tanto el colado de los especímenes como la conservación del contenedor térmico durante las 24 horas de curado adiabático, deben efectuarse en un ambiente protegido del sol y a una temperatura mantenida entre 15 y 27°C, tal como se halla previsto en el método C de ASTM C 684 y en la práctica ASTM C 31.

- b) Debe tomarse en cuenta la temperatura inicial del concreto al establecer las curvas de predicción entre la resistencia acelerada a 24 horas y la resistencia normal a 28 días; de este modo, en caso de variaciones de esta temperatura que lo justifiquen, puede convenir el establecimiento de una "familia de curvas de pronóstico" para diferentes intervalos de la temperatura inicial del concreto.

6. Tal vez una de la mayores ventajas observadas al aplicar este método, fue la alta proporción de la resistencia de 28 días que se obtuvo en solo 24 horas. Dicha proporción, que como en otros métodos aumentó con el nivel de resistencia del concreto, fluctuó en este caso entre 50 y 90 por ciento para todas las mezclas ensayadas, lo cual la situó por arriba de otros métodos similares, según se muestra en la siguiente tabla:

<u>Método</u> <u>acelerado</u>	<u>Resistencias de 28 días</u> <u>(R_{28}), rango en kg/cm².</u>	<u>Edad de la resistencia</u> <u>acelerada (R_a), horas.</u>	<u>Relación</u> <u>R_a/R_{28},</u> <u>rango, %.</u>
B, de ASTM	200 - 450	28½	35 - 65 (+)
C, de ASTM	200 - 400	49	35 - 50 (+)
Actual	200 - 450	24	50 - 90

(+) Datos obtenidos de antiguas aplicaciones locales de estos métodos^[14,15].

Cabe suponer que el mayor nivel registrado en la relación R_a/R_{28} se deba a dos aspectos principales propios del método actualmente evaluado: 1) el doble efecto acumulado que produce el cloruro de calcio, y 2) el empleo de cubos en vez de cilindros para medir la resistencia acelerada.

Se considera que esta característica del método evaluado resulta muy conveniente, pues conforme a ella, en la prueba acelerada de los concretos con mayor resistencia se someten los especímenes a esfuerzos relativamente cercanos a los de 28 días, y con ello se reduce la probabilidad de cometer errores de pronóstico debidos a un imprevisto comportamiento deficiente del concreto bajo esfuerzo, tal como sucede cuando el concreto falla anticipadamente por falta de suficiente adherencia entre los agregados y la pasta de cemento. En tal concepto, se puede ofrecer un campo de aplicación interesante para este método, en relación con el control de calidad de los

concretos denominados de "alto comportamiento" cuyas resistencias de diseño suelen ser muy altas.

7. Dado que en términos generales se le apreciaron características convenientes al método evaluado, se considera útil su empleo con las debidas precauciones y limitaciones. Con base en ello, en el apéndice B se presenta una propuesta para la normalización de este método.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

VII BIBLIOGRAFÍA

- (1) ASTM Designation C 684. "Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens", American Society for testing and materials, Philadelphia, Pa., USA 1989
- (2) ACI committee 214, Report 214.1R. "Use of Accelerated Strength Testing", American Concrete Institute, Detroit, Mich., USA 1986
- (3) Mena Ferrer, M. "Prueba Acelerada para Pronosticar la Resistencia del Concreto", Construcción y Tecnología Vol. VII No.82, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, D.F., México 1995
- (4) Mena Ferrer, M. "Manual de Tecnología del Concreto", Sección 1, Comisión Federal de Electricidad - Instituto de Ingeniería UNAM, D.F., México 1994
- (5) Mena Ferrer, M. "Manual de Tecnología del Concreto", Sección 2, Comisión Federal de Electricidad - Instituto de Ingeniería UNAM, D.F., México 1994
- (6) ACI Committee 212, Report 212.3R. "Chemical Admixtures for Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Mich., USA 1991

- (7) **ASTM Designation D 98. "Standard Specification for Calcium Chloride", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., USA 1993**
- (8) **Master Builders Technologies - Tecnocreto. "Pruebas de Laboratorio en Muestras con Cloruro de Calcio: Reporte Interno", Naucalpan Méx., México 1994**
- (9) **Ramachandran, V.S. "Calcium Chloride in Concrete - Science and Technology", Applied Science Publishers, London, Eng., G.B. 1981**
- (10) **Neville, A.M. and Brooks, J.J. "Concrete Technology", Longman Scientific and Technical, Essex, Eng., G.B. 1990**
- (11) **Mendoza Escobedo, C.J., Fuentes González A. y Carmona Flores C.M. "Concretos Fabricados con Arenas y Gravas Calizas Disponibles en el D.F.", Informe para la Secretaría General de Obras, Departamento del Distrito Federal, D.F., México 1995**
- (12) **ACI committee 211, Report 211.1. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Mich., USA 1985**
- (13) **Mena Ferrer, M. y Loera P., S. "Guía para Fabricación y Control de Concreto en Obras Pequeñas", Publicación 299, Instituto de Ingeniería UNAM, D.F., México 1972**
- (14) **Sánchez Trejo, R y Flores Castro, L. "Experience in the Use of the Accelerated Testing Procedure for the Control of Concrete During the Construction of Tunnel Emisor Central in México City", ACI Publication SP-56, American Concrete Institute, Detroit, Mich., USA 1978**
- (15) **Mena Ferrer, M. "Quality Control of Concrete by Means of Short-Term Tests at La Angostura Hydroelectric Project, State of Chiapas, México", ACI Publication SP-56, American Concrete Institute, Detroit, Mich., USA 1978**

Tabla 1 Principales características de los métodos ASTM para el curado acelerado.

PROCEDIMIENTO	MOLDES	MEDIO DE CURADO ACELERADO	TEMPERATURA DEL CURADO ACELERADO	EDAD DE INICIO DEL CURADO ACELERADO	DURACIÓN DEL CURADO ACELERADO	EDAD DE PRUEBA
A. AGUA CALIENTE	REUSABLES o DESECHABLES	AGUA	35°C	INMEDIATAMENTE DESPUÉS DEL COLADO	23.5 hr ± 30 min	24 hr ± 15 min
B. AGUA EN EBULLICIÓN	REUSABLES o DESECHABLES	AGUA	HIRVIENDO	23 hr ± 15 min DESPUÉS DEL COLADO	3.5 hr ± 5 min	28.5 hr ± 15 min
C. CURADO AUTÓGENO	DESECHABLE	CALOR DE HIDRATACIÓN	AUMENTO PROGRESIVO POR LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO	INMEDIATAMENTE DESPUÉS DEL COLADO	48 hr ± 15 min	49 hr ± 15 min
D. TEMPERATURA Y PRESIÓN	REUSABLE	PRESIÓN Y CALOR EXTERNO	149°C	INMEDIATAMENTE DESPUÉS DEL COLADO	5 hr ± 5 min	5.25 hr ± 5 min

Tabla 2 Ventajas y/o limitaciones de los métodos ASTM para el curado acelerado.

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	LIMITACIÓN	VENTAJA	OBSERVACIONES
USO DE ALGUNA FUENTE DE ENERGÍA EXTERNA PARA SU EJECUCIÓN	A	X		REQUIERE ENERGÍA ELÉCTRICA Y UNA SUSPENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ESTA PUEDE ARROJAR RESULTADOS ERRÓNEOS
	B	X		
	C		X	NO REQUIERE NINGUNA FUENTE DE ENERGÍA EXTERNA
	D	X		REQUIERE ENERGÍA ELÉCTRICA Y UNA SUSPENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ESTA PUEDE ARROJAR RESULTADOS ERRÓNEOS
TIEMPO EN EL QUE SE OBTIENEN LOS RESULTADOS	A		X	A LAS 24 HORAS, LO QUE PERMITE SER COMPATIBLE CON LOS HORARIOS DE LA JORNADA DE TRABAJO
	B	X		A LAS 26 HORAS, LO CUAL PUEDE SER UNA DESVENTAJA YA QUE LA HORA DE ENSAYE PUEDE DESFAZARSE DE LA JORNADA DE TRABAJO
	C	X		A LAS 49 HORAS, LO QUE PUEDE RESULTAR EN ALGUNOS CASOS DEMASIADO TARDE
	D		X	A LAS 5 HORAS, LO QUE DEFINITIVAMENTE RESULTA SER VENTAJOSO YA QUE PERMITE OBTENER RESULTADOS EN UNA SOLA JORNADA DE TRABAJO
EJECUCIÓN Y/O DESARROLLO DEL MÉTODO DE PRUEBA CON EL EQUIPO NECESARIO	A		X	FÁCIL EJECUCIÓN, ADEMÁS DE QUE RELATIVAMENTE NO REQUIERE DE UN EQUIPO COMPLEJO
	B	X		PARA SU EJECUCIÓN SE REQUIEREN MEDIDAS DE SEGURIDAD, YA QUE UTILIZA AGUA hirviendo, ADEMÁS, SU EQUIPO ES MÁS SOPSTICADO
	C		X	FÁCIL EJECUCIÓN, NO REQUIERE DE EQUIPO COMPLEJO NI DE NINGUNA MEDIDA DE SEGURIDAD.
	D	X		ES UN MÉTODO LABORIOSO EN SU EJECUCIÓN, REQUIERE UN EQUIPO COMPLEJO Y COSTOSO, ADEMÁS, NECESITA MEDIDAS DE SEGURIDAD
RELACIÓN DE LA RESISTENCIA ACCELERADA (R_a) A LA RESISTENCIA ÚLTIMA (R_u)	A	X		SE HA OBSERVADO EN LA PRÁCTICA DE MANERA GENERAL, QUE TODOS LOS MÉTODOS PRESENTAN UNA RELACIÓN R_a/R_u SENSIBLEMENTE MENOR DE 1.0
	B	X		
	C	X		
	D	X		
REQUISITOS DE APLICABILIDAD Y VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	A	X		LA APLICACIÓN DE TODOS LOS MÉTODOS SIN EXCEPCIÓN Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS, SERÁN ÚNICAMENTE CONFIABLES SIEMPRE Y CUANDO SE MANTENGAN LAS MISMAS CARACTERÍSTICAS CON LAS CUALES SE LLEVARON A CABO LAS CORRELACIONES DE RESISTENCIA, TANTO DE MATERIALES COMO DE CONDICIONES DEL LUGAR
	B	X		
	C	X		
	D	X		

Tabla 3 Especificaciones técnicas del material aislante térmico rígido utilizado en la construcción del recipiente de curado autógeno.

AISLANTE TÉRMICO RÍGIDO				
CARACTERÍSTICAS		UNIDAD	MÉTODO ASTM	VALOR
DENSIDAD LIBRE		kg/m ³	D 1622	26 - 27
DENSIDAD APLICADA		kg/m ³	D 1622	32
FACTOR K	INICIAL	Btu-in/hr-ft ² -°F	C 177	0.13
	ENVEJECIDO	Btu-in/hr-ft ² -°F	C 177	0.17
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	PARALELO	psi	D 1623	34
	PERPENDICULAR	psi	D 1623	20
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	PARALELO	psi	D 1621	30
	PERPENDICULAR	psi	D 1621	26
RESISTENCIA AL DESGARRE		psi	C 273	18
CONTENIDO DE CELDAS CERRADAS		%	D 1940	94
ABSORCIÓN DE AGUA SUMERGIDO UNA SEMANA		lbs/ft		0.10
CAMBIO VOLUMÉTRICO EN UNA SEMANA A 38°C Y 100% DE HUMEDAD RELATIVA		%		3.9

Tabla 4 Especificaciones técnicas del material aislante térmico flexible utilizado en la construcción del recipiente de curado autógeno.

AISLANTE TÉRMICO FLEXIBLE			
CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO ASTM	VALOR
DENSIDAD	kg/m ³	D 1564	35 - 40
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	psi	D 1564	15 - 25
FUERZA A LA ROTURA	lb/in	D 1564	1.8 - 3.5
ELONGACIÓN	%	D 1564	160 - 300
GRADO DE COMPRESIÓN PERMANENTE, A UN 90% DURANTE 22 HORAS Y A 70°C	%	D 1564	10 máximo
CELDILLAS	ppi	D 1564	30 - 35
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	°C		- 40 a 149

Tabla 5 Resultados de las pruebas físicas efectuadas a la arena andesítica utilizada en el estudio.

INSTITUTO DE INGENIERÍA U N A M Laboratorio de Estructuras y Materiales PRUEBAS FÍSICAS DE ARENA				Descripción: Procedencia: Fecha:		Arena andesítica Minas de Santa Fe 12-febrero-96			
CONCEPTOS		PRUEBA 1			PRUEBA 2			PROMEDIO	
1) Análisis granulométrico:		Peso (g)	% Ind.	% Acum.	Peso (g)	% Ind.	% Acum.	% Ind.	% Acum.
Retenido malla No. 4		9100	13.73		9100	13.73		13.73	
Pasa por malla No. 4		57200	86.27		57200	86.27		86.27	
Suma		66300	100.00		66300	100.00		100.00	
1.1) Granulometría por mallas									
Retenido malla No. 4		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Retenido malla No. 8		115.9	21.31	21.31	116.7	21.33	21.33	21.32	21.32
Retenido malla No. 16		99.8	18.35	39.66	99.3	18.15	39.47	18.25	39.57
Retenido malla No. 30		87.0	16.00	55.65	87.2	15.94	55.41	15.97	55.53
Retenido malla No. 50		78.1	14.36	70.01	79.5	14.53	69.94	14.44	69.98
Retenido malla No. 100		54.8	10.08	80.09	55.6	10.16	80.10	10.12	80.09
Pasa malla No.100		108.3	19.91	100.00	108.9	19.90	100.00	19.91	100.00
Suma		543.9	100.00		547.2	100.00		100.00	
Módulo de finura				2.67			2.66		2.66
2) Pasa malla No.200 (Lavado):		Peso sucio (g)	Peso lavado (g)	Pérdida x lavado (%)	Peso sucio (g)	Peso lavado (g)	Pérdida x lavado (%)	Pérdida x lavado (%)	
		335	276.1	17.58	309.8	257.2	16.98	17.28	
3) Densidad:		Psss (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Psss (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)	
		500.0	203.0	2.46	500.0	205.0	2.44	2.45	
4) Absorción:		Ps (g)	Psss-Ps (g)	Absorción (%)	Ps (g)	Psss-Ps (g)	Absorción (%)	Absorción (%)	
		484.9	15.1	3.11	486.3	13.7	2.82	2.97	
5) Peso volumétrico seco y suelto		Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	P.V. (kg/m³)	
		10.541	7.070	1490.95	10.564	7.070	1494.20	1492.48	
6) Peso volumétrico seco y compacto		Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	P.V. (kg/m³)	
		11.695	7.070	1654.17	11.756	7.070	1662.80	1658.49	
Ensayó:		Francisco Reyes Morán Carlos M. Carmona Flores					Fecha: 20-febrero-96		

Tabla 6 Resultados de las pruebas físicas efectuadas a la grava caliza utilizada en el estudio.

INSTITUTO DE INGENIERÍA U N A M Laboratorio de Estructuras y Materiales PRUEBAS FÍSICAS DE GRAVA				Descripción: Grava caliza 3/4" Procedencia: Hidalgo (Edo) Fecha: 12-febrero-96			
CONCEPTOS	PRUEBA 1			PRUEBA 2			PROMEDIO
1) Análisis granulométrico:	Peso (kg)	% Ind.	% Acum.	Peso (kg)	% Ind.	% Acum.	% Ind. % Acum.
Retenido malla No.4	76.800	97.71		76.800	97.71		97.71
Pasa por malla No.4	1.800	2.29		1.800	2.29		2.29
Suma	78.600	100.00		78.600	100.00		100.00
1.1) Granulometría por mallas							
Retenido malla 152.4 mm (6 pulg)							
Retenido malla 75.2 mm (3 pulg)							
Retenido malla 37.5 mm (1.5 pulg)							
Retenido malla 19.1 mm (3/4 pulg)	14.500	18.45	18.45	14.500	18.45	18.45	18.45
Retenido malla 9.5 mm (3/8 pulg)	51.500	65.52	83.97	51.500	65.52	83.97	83.97
Retenido malla No.4	10.800	13.74	97.71	10.800	13.74	97.71	13.74
Pasa por malla No.4	1.800	2.29	100.00	1.800	2.29	100.00	2.29
Suma	78.600	100.00		78.600	100.00		100.00
2) Densidad:	Psss (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Psss (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
Grava 1-a	989.0	370.0	2.67	1033.0	384.0	2.69	2.68
Grava 1-b	1456.0	543.0	2.68	1553.0	579.0	2.68	2.68
Grava 2	1396.0	520.0	2.68	1627.0	607.0	2.68	2.68
3) Absorción:	Ps (g)	Psss-Ps (g)	Absorción (%)	Ps (g)	Psss-Ps (g)	Absorción (%)	Absorción (%)
Grava 1-a	985.0	4.0	0.41	1027.0	6.0	0.58	0.50
Grava 1-b	1448.0	8.0	0.55	1544.0	9.0	0.58	0.57
Grava 2	1389.0	7.0	0.50	1618.0	9.0	0.56	0.53
4) Peso volumétrico seco y suelto	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	P.V. (kg/m³)
Grava Integral	10.474	7.070	1481	10.414	7.070	1473	1477
5) Peso volumétrico seco y compacto	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	Peso (kg)	Volumen x10³ (m³)	P.V. (kg/m³)	P.V. (kg/m³)
Grava Integral	11.441	7.070	1618	11.474	7.070	1623	1621
Ensayó.	Francisco Reyes Morán Carlos M. Carmona Flores			Fecha: 20-febrero-96			

Tabla 7 Resultados de las pruebas físicas y análisis químico efectuados al cemento portland-puzolana utilizado en el estudio.

TIPO DE CEMENTO: PORTLAND-PUZOLANA
FECHA DE MUESTREO: 5-ABRIL-96

PRUEBAS FÍSICAS			
AGUA DE CONSISTENCIA NORMAL ASTM C 187		(%)	27.8
TIEMPO DE FRAGUADO (VICAT) ASTM C 191	INICIAL	(HRS:MIN)	2:30
	FINAL	(HRS:MIN)	4:10
FINURA	PASA MALLA No.200	(%)	99.6
ASTM C 430	PASA MALLA No.325	(%)	97.7
SUPERFICIE ESPECÍFICA, BLAINE ASTM C 204		(cm ² /g)	3765
SANIDAD: EXPANSIÓN AUTOCLAVE ASTM C 151		(%)	-0.031
FRAGUADO FALSO MÉTODO ASTM C 451	PENETRACIÓN INICIAL	(mm)	29
	PENETRACIÓN 2-3-4	(mm)	--
	PENETRACIÓN FINAL	(mm)	24
	% DE PENETRACIÓN FINAL	(%)	86
RESISTENCIA A COMPRESIÓN MÉTODO ASTM C 109	A 24 HORAS	(MPa)	--
	A 3 DÍAS	(MPa)	24.7
	A 7 DÍAS	(MPa)	30.5
	A 28 DÍAS	(MPa)	38.1

PRUEBAS QUÍMICAS			
ANÁLISIS QUÍMICO EN PORCIENTO ASTM C 114	SiO ₂	Sílice	16.5
	Al ₂ O ₃	Alúmina	4.7
	Fe ₂ O ₃	Oxido férrico	3.1
	CaO	Cal combinada	53.3
	CaO	Cal libre	0.2
	MgO	Magnesia	1.2
	SO ₃	Anhidrido sulfúrico	1.9
	Residuo insoluble		16.4
	Pérdida por ignición		1.6
	SUMA:		98.9
	Na ₂ O		Oxido de sodio	0.20
K ₂ O		Oxido de potasio	0.56
Total de álcalis		(Na ₂ O + 0.658K ₂ O)	0.57
CONSTITUCIÓN EN PORCIENTO	Silicato tricálcico		--
	Silicato dicálcico		--
	Aluminato tricálcico		--
	Ferroaluminato tretacálcico		--
SUMA:		--	
CONTENIDO APROXIMADO DE PUZOLANA: 18%			

Tabla 8 Resultados de las pruebas físicas y análisis químico efectuados al cemento portland tipo I utilizado en el estudio.

TIPO DE CEMENTO: PORTLAND TIPO I
FECHA DE MUESTREO: 5-ABRIL-96

PRUEBAS FÍSICAS			
AGUA DE CONSISTENCIA NORMAL ASTM C 187		(%)	25.8
TIEMPO DE FRAGUADO (VICAT) ASTM C 191	INICIAL	(HRS:MIN)	2:30
	FINAL	(HRS:MIN)	3:30
FINURA ASTM C 430	PASA MALLA No 200	(%)	99.6
	PASA MALLA No 325	(%)	95.4
SUPERFICIE ESPECÍFICA, BLAINE ASTM C 204		(cm ² /g)	3980
SANIDAD: EXPANSIÓN AUTOCLAVE ASTM C 151		(%)	-0.040
FRAGUADO FALSO MÉTODO ASTM C 451	PENETRACIÓN INICIAL	(mm)	28
	PENETRACIÓN 2-3-4	(mm)	--
	PENETRACIÓN FINAL	(mm)	25
	% DE PENETRACIÓN FINAL	(%)	89
RESISTENCIA A COMPRESIÓN MÉTODO ASTM C 109	A 24 HORAS	(MPa)	--
	A 3 DÍAS	(MPa)	27.5
	A 7 DÍAS	(MPa)	32.9
	A 28 DÍAS	(MPa)	37.0

PRUEBAS QUÍMICAS			
ANÁLISIS QUÍMICO EN PORCIENTO ASTM C 114	SiO ₂	Sílice	20.0
	Al ₂ O ₃	Alúmina	5.2
	Fe ₂ O ₃	Oxido férrico	2.7
	CaO	Cal combinada	63.4
	CaO	Cal libre	0.2
	MgO	Magnesia	1.8
	SO ₃	Anhidrido sulfúrico	2.7
	Residuo insoluble		0.6
	Pérdida por ignición		2.8
	SUMA:		99.4
	Na ₂ O	Oxido de sodio	0.05
Total de álcalis	K ₂ O	Oxido de potasio	0.82
	(Na ₂ O + 0.658K ₂ O)		0.59
CONSTITUCIÓN EN PORCIENTO	Silicato tricálcico		59.61
	Silicato dicálcico		12.37
	Aluminato tricálcico		9.21
	Ferroaluminato tetra cálcico		8.22
	SUMA:		89.41

Tabla 9 Resultados de la determinación del calor de hidratación para los dos tipos de cemento utilizados en el estudio.

DETERMINACIÓN DEL CALOR DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO HIDRÁULICO ASTM C 186			
IDENTIFICACIÓN		CALOR DE HIDRATACIÓN	
TIPO DE CEMENTO	FECHA DE MUESTREO	7 DÍAS kJ/kg	28 DÍAS kJ/kg
PORTLAND-PUZOLANA	5-ABRIL-96	282.54	298.87
PORTLAND TIPO I	5-ABRIL-96	366.41	372.38
ESPECIFICACIÓN ASTM C 150-94 TIPO I ESPECIFICACIÓN ASTM C 595-94 TIPO IP		** 293 máx	** 335 máx
OBSERVACIONES: ** La norma ASTM C 150-94 no marca especificación			

Tabla 10 Proportionamientos y características de las mezclas con cemento portland - puzolánico, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

TIPO DE CEMENTO: PORTLAND - PUZOLANA	DESIGNACIÓN DE LAS MEZCLAS							
	C-8	C-1	C-3	C-2	C-9	C-4	C-6-A	C-7
Proportionamientos empleados								
CEMENTO (kg/m ³)	232.20	290.51	336.10	385.52	229.04	286.10	329.45	379.86
AGUA (MEZCLADO NETO) (kg/m ³)	205.07	205.77	208.48	208.90	190.80	190.63	199.14	201.83
ARENA (100%) SECA (kg/m ³)	833.49	744.71	741.90	695.59	851.42	781.88	747.04	685.19
GRAVA (100%) SECA (kg/m ³)	954.78	1008.55	970.72	976.60	973.82	992.93	973.56	997.83
ADITIVO REDUCTOR DE AGUA (4 ml/kg de cemento) (kg/m ³)	-----	-----	-----	-----	1.124	1.397	1.571	1.816
REDUCCIÓN DE AGUA (%)	-----	-----	-----	-----	6.96	7.36	4.48	3.38
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.883	0.708	0.620	0.542	0.833	0.666	0.604	0.531
RELACIÓN ARENA-GRAVA (%-%)	46.6 - 53.4	42.5 - 57.5	43.3 - 56.7	41.6 - 58.4	46.6 - 53.4	44.1 - 55.9	43.4 - 56.6	40.7 - 59.3
Características de las mezclas								
REVENIMIENTO (cm)	10.00	7.90	9.30	7.53	7.57	7.50	8.23	8.07
PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	2260.54	2282.04	2289.25	2297.03	2282.18	2286.56	2282.74	2296.61
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.55	1.70	1.65	1.75	2.00	2.00	2.00	2.00
TEMPERATURA INICIAL (°C)	22.3	20.2	22.0	21.2	20.5	20.0	21.7	21.4

Tabla 11 Proportionamientos y características de las mezclas con cemento portland tipo I, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

TIPO DE CEMENTO: PORTLAND - TIPO I	DESIGNACIÓN DE LAS MEZCLAS							
	C-16	C-14	C-12	C-10	C-17	C-15	C-13	C-11
Proportionamientos empleados								
CEMENTO (kg/m ³)	236.75	294.96	339.06	384.67	233.77	292.12	333.35	379.96
AGUA (MEZCLADO NETO) (kg/m ³)	193.22	194.00	198.94	206.70	182.10	183.67	185.21	193.32
ARENA (100%) SECA (kg/m ³)	849.80	756.10	748.42	694.05	860.06	771.26	759.42	711.32
GRAVA (100%) SECA (kg/m ³)	973.44	1023.97	979.27	972.46	983.99	1038.66	988.55	990.68
ADITIVO REDUCTOR DE AGUA (4 ml/kg de cemento) (kg/m ³)	.....	.....	.....	.....	1.110	1.408	1.600	1.762
REDUCCIÓN DE AGUA (%)	.....	.....	.....	.....	5.76	5.32	6.90	6.47
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.816	0.658	0.587	0.537	0.780	0.629	0.556	0.509
RELACIÓN ARENA-GRAVA (%-%)	46.6 - 53.4	42.5 - 57.5	43.3 - 56.7	41.6 - 58.4	46.6 - 53.4	42.6 - 57.4	43.3 - 56.6	41.7 - 58.2
Características de las mezclas								
REVENIMIENTO (cm)	7.57	9.13	9.33	10.53	8.67	7.50	8.70	9.93
PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	2288.83	2301.70	2297.74	2290.10	2296.75	2320.51	2300.85	2308.20
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.80	1.65	1.95	1.80	2.10	1.80	2.30	2.50
TEMPERATURA INICIAL (°C)	21.6	21.3	20.0	21.9	21.5	21.9	21.3	22.8

Tabla 12 Fragmento del registro de temperaturas del colado C-2, obtenido mediante el equipo de monitoreo durante el desarrollo del método de prueba propuesto.

COLADO C-2 (17-ABRIL-96)									DATOS PROCESADOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA GRÁFICA DE VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA				COMPARACIÓN DEL GRADO DE MADUREZ ADQUIRIDO A TRAVÉS DEL TIEMPO EN :	
INICIO DE MONITOREO: 17-abril-96 hora: 13:16:59														
FINAL DE MONITOREO: 18-abril-96 hora: 13:18:13														
INTERVALO DE REGISTRO: 4.980 minutos														
TIEMPO hr	SENSORES DE TEMPERATURA (°C)								TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	PROM. de TEMP. DEL CONCRETO AL AMBIENTE (°C)	TEMP. AMBIENTE EN EL INTERIOR DEL RECIPIENTE AUTÓGENO (°C)	PROM. de TEMP. DEL CONCRETO EN RECIPIENTE AUTÓGENO (°C)	ESPECÍMENES EN CURADO AL AMBIENTE (horas x °C)	ESPECÍMENES EN CURADO AUTÓGENO (horas x °C)
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8						
0.00	21.4	21.2	21.2	21.2	21.9	22.6	22.9	22.6	21.40	21.20	21.90	22.70	0.00	0.00
0.08	21.4	21.3	21.4	21.2	22.9	22.5	22.9	23.0	21.40	21.30	22.90	22.80	1.78	1.89
0.17	21.4	21.2	21.2	21.1	22.5	22.4	22.3	23.0	21.40	21.17	22.50	22.57	3.33	3.77
0.25	21.4	21.2	21.4	21.1	22.3	22.4	22.9	22.6	21.40	21.23	22.30	22.83	5.29	5.65
0.33	21.4	21.2	21.4	21.1	22.2	22.4	22.8	22.2	21.40	21.23	22.20	22.47	7.05	7.52
0.42	21.3	21.2	21.2	21.2	22.2	22.4	22.2	22.9	21.30	21.20	22.20	22.50	8.81	9.38
0.50	21.4	21.3	21.4	21.2	22.2	22.4	22.8	22.2	21.40	21.30	22.20	22.47	10.57	11.25
0.58	21.3	21.3	21.4	21.2	22.3	22.4	22.6	22.3	21.30	21.30	22.30	22.43	12.34	13.11
0.66	21.3	21.3	21.4	21.2	22.3	22.5	22.6	22.7	21.30	21.30	22.30	22.80	14.11	14.98
0.75	21.1	21.3	21.4	21.4	22.3	22.6	22.9	22.7	21.10	21.37	22.30	22.73	15.88	16.88
0.83	21.1	21.3	21.4	21.4	22.3	22.6	22.3	23.0	21.10	21.37	22.30	22.83	17.85	18.75
0.91	21.1	21.3	21.4	21.4	22.5	22.6	22.8	23.0	21.10	21.37	22.50	22.80	19.43	20.63
1.00	21.1	21.3	21.4	21.4	22.5	22.8	22.9	23.3	21.10	21.37	22.50	23.00	21.20	22.53
1.08	21.0	21.3	21.5	21.4	22.6	22.9	23.1	22.9	21.00	21.40	22.60	22.97	22.97	24.44
1.16	21.0	21.5	21.5	21.4	22.8	23.1	23.4	23.0	21.00	21.47	22.80	23.17	24.75	26.36
1.25	21.1	21.5	21.7	21.5	22.8	23.2	22.9	23.7	21.10	21.57	22.80	23.27	26.54	28.26
1.33	21.1	21.5	21.7	21.5	22.9	23.5	23.9	23.6	21.10	21.57	22.90	23.87	28.33	30.23
1.41	21.1	21.5	21.7	21.7	23.1	23.5	23.9	23.7	21.10	21.63	23.10	23.70	30.12	32.20
1.49	21.1	21.6	21.7	21.7	23.2	23.8	23.7	24.4	21.10	21.67	23.20	23.97	31.92	34.17
1.58	21.1	21.6	21.8	21.7	23.2	23.9	23.8	24.5	21.10	21.70	23.20	24.07	33.72	36.17
1.66	21.0	21.8	22.0	21.8	23.4	24.0	24.5	24.3	21.00	21.80	23.40	24.27	35.52	38.17
1.74	21.0	21.7	22.0	21.9	23.5	24.3	24.5	24.5	21.00	21.87	23.50	24.43	37.34	40.19
1.83	21.0	21.7	22.0	21.8	23.8	24.5	24.8	25.1	21.00	21.83	23.80	24.80	39.15	42.24

Tabla 13 Madureces adquiridas por el concreto durante 24 horas, tanto de los especímenes curados al ambiente como de los especímenes en curado adiabático (método propuesto).

DESIGNACIÓN DEL COLADO	CONSUMO DE CEMENTO (kg/m³)	MADUREZ DESARROLLADA DURANTE 23.75 HORAS POR ESPECÍMENES EN CURADO:		ESTIMACIÓN DE LA MADUREZ OBTENIDA DURANTE 28 DÍAS EN CURADO ESTÁNDAR (horas x °C)	MADUREZ A 24 HORAS EXPRESADA COMO POR CIENTO DE LA OBTENIDA A 28 DÍAS		INCREMENTO DE MADUREZ (%)
		AL AMBIENTE (s/cloruro) (horas x °C)	AUTÓGENO (c/cloruro) (horas x °C)		CURADO AMBIENTE (%)	CURADO AUTÓGENO (%)	
MEZCLAS ELABORADAS CON CEMENTO PUZOLÁNICO							
C-8	232.20	626.05	782.94	15530.05	4.03	5.04	1.01
C-9	229.04	581.51	746.31	15485.51	3.76	4.82	1.06
C-1	290.51	567.38	749.84	15471.38	3.67	4.85	1.18
C-4	286.10	542.43	748.05	15446.43	3.51	4.84	1.33
C-3	336.10	600.00	839.10	15646.09	3.83	5.36	1.53
C-6-A	329.45	617.75	871.26	15521.75	3.98	5.61	1.63
C-2	385.52	531.91	841.70	15435.91	3.45	5.45	2.01
C-7	379.86	618.90	918.46	15522.90	3.99	5.92	1.93
MEZCLAS ELABORADAS CON CEMENTO TIPO I							
C-16	236.75	578.94	742.20	15482.94	3.74	4.79	1.05
C-17	233.77	586.07	762.19	15490.07	3.78	4.92	1.14
C-14	294.96	608.03	807.17	15512.03	3.92	5.20	1.28
C-15	292.12	618.03	847.73	15522.03	3.98	5.46	1.48
C-12	339.06	572.37	809.77	15476.37	3.70	5.23	1.53
C-13	333.35	572.96	852.93	15476.96	3.70	5.51	1.81
C-10	384.67	592.30	900.76	15496.3	3.82	5.81	1.99
C-11	379.96	651.65	962.96	15555.65	4.19	6.19	2.00

Tabla 14 Resultados obtenidos de los ensayos efectuados a 24 horas en las mezclas con cemento puzolánico, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

RESULTADOS DE ENSAYES A LOS ESPÉCIMENES CÚBICOS
DE 15x15x15 cm A UN TIEMPO DE CURADO DE: 23 hr 50 min.

TIPO DE PRUEBA: COMPRESIÓN

EDAD DE PRUEBA: 24 hr.

MEZCLAS CON CEMENTO: PUZOLÁNICO

No. Colado	Tipo de curado	No. Especimen	Carga Directa (kg)	Área (cm ²)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)	Resistencia Media (kg/cm ²)	Desviación Estándar (kg/cm ²)	Coefficiente de variación (%)	Porcentaje de incremento de resistencia (%)
C-1 11-ABR-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	20100	225	89	89	1.28	1.45	90.97
		2	19600	225	87				
		3	20100	225	89				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	39100	225	174	169	7.95	4.70	
		2	36000	225	160				
		3	39100	225	174				
C-2 17-ABR-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	32300	225	144	145	1.12	0.77	86.90
		2	32600	225	145				
		3	32800	225	146				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	61000	225	271	271	6.24	2.31	
		2	59400	225	264				
		3	62200	225	276				
C-3 22-ABR-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	26325	225	117	117	1.00	0.85	80.66
		2	26100	225	116				
		3	26550	225	118				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	48100	225	214	211	3.37	1.59	
		2	46700	225	208				
		3	47900	225	213				
C-4 26-ABR-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	22200	225	99	99	1.56	1.58	98.95
		2	21900	225	97				
		3	22600	225	100				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	45100	225	200	197	5.21	2.65	
		2	42900	225	191				
		3	44700	225	199				
C-6-A 13-MAY-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	32700	225	145	146	1.80	1.23	91.86
		2	32400	225	144				
		3	33200	225	148				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	63700	225	283	279	3.22	1.15	
		2	62400	225	277				
		3	62500	225	278				
C-7 16-MAY-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	40400	225	180	177	2.78	1.57	81.54
		2	39200	225	174				
		3	40100	225	178				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	74000	225	329	322	6.51	2.02	
		2	71100	225	316				
		3	72200	225	321				
C-8 29-MAY-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	14210	225	63	63	0.52	0.82	79.44
		2	14290	225	64				
		3	14060	225	62				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	25800	225	115	113	1.33	1.18	
		2	25250	225	112				
		3	25320	225	113				
C-9 03-JUN-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	17000	225	76	74	1.74	2.35	89.77
		2	16230	225	72				
		3	16730	225	74				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	32000	225	142	140	2.86	2.04	
		2	30860	225	137				
		3	31950	225	142				

Tabla 15 Resultados obtenidos de los ensayos efectuados a 24 horas en las mezclas con cemento tipo I, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

RESULTADOS DE ENSAYES A LOS ESPÉCIMENES CÚBICOS
DE 15x15x15 cm A UN TIEMPO DE CURADO DE: 23 hr. 50 min.

TIPO DE PRUEBA: COMPRESIÓN
EDAD DE PRUEBA: 24 hr.

MEZCLAS CON CEMENTO: TIPO I.

No. Colado	Tipo de curado	No. Espécimen	Carga Directa (kg)	Área (cm ²)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)	Resistencia Media (kg/cm ²)	Desviación Estándar (kg/cm ²)	Coefficiente de variación (%)	Porcentaje de incremento de resistencia
C-10 20-JUN-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	41600	225	185	183	2.72	1.49	85.96
		2	41200	225	183				
		3	40400	225	180				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	76600	225	340	339	10.04	2.96	
		2	74000	225	329				
		3	78500	225	349				
C-11 24-JUN-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	52000	225	231	233	9.94	4.26	76.94
		2	54900	225	244				
		3	50500	225	224				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	94800	225	421	413	15.53	3.76	
		2	88800	225	395				
		3	94900	225	422				
C-12 01-JUL-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	32300	225	144	146	2.04	1.40	84.55
		2	32900	225	148				
		3	33200	225	148				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	61000	225	271	269	9.94	3.70	
		2	58100	225	258				
		3	62500	225	278				
C-13 04-JUL-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	43000	225	191	191	5.78	3.03	80.59
		2	41600	225	185				
		3	44200	225	196				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	77000	225	342	345	3.03	0.88	
		2	78300	225	348				
		3	77300	225	344				
C-14 09-JUL-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	30700	225	136	131	7.85	5.99	67.25
		2	27470	225	122				
		3	30320	225	135				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	51500	225	229	219	11.11	5.06	
		2	49900	225	222				
		3	46600	225	207				
C-15 11-JUL-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	37400	225	166	171	8.86	5.18	69.09
		2	37300	225	166				
		3	40800	225	181				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	64800	225	288	289	4.38	1.51	
		2	64300	225	286				
		3	66200	225	294				
C-16 07-AGO-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	19370	225	86	86	1.81	2.11	61.30
		2	19600	225	87				
		3	18810	225	84				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	31700	225	141	138	2.89	2.09	
		2	30400	225	135				
		3	31100	225	138				
C-17 12-AGO-96	AL AMBIENTE (s/cloruro)	1	23780	225	106	106	0.65	0.61	63.59
		2	23890	225	106				
		3	24070	225	107				
	AUTÓGENO (c/cloruro)	1	39500	225	176	174	3.80	2.19	
		2	38140	225	170				
		3	39720	225	177				

Tabla 16 Resultados obtenidos de los ensayos efectuados a 28 días en las mezclas con cemento puzolánico, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

RESULTADOS DE ENSAYES A ESPECÍMENES:

CÚBICOS DE 15x15x15 cm.

CILINDRICOS DE 15x30 cm.

TIPO DE CURADO: ASTM C 192

TIPO DE PRUEBA: COMPRESIÓN

EDAD DE PRUEBA: 28 DÍAS.

MEZCLAS CON CEMENTO: PUZOLÁNICO

No. Colado	Tipo de Especimen	No. Especimen	Carga Directa (kg)	Área (cm ²)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)	Resistencia Media (kg/cm ²)	Desviación Estándar (kg/cm ²)	Coefficiente de variación (%)	Porcentaje de incremento de resistencia (%)
C-1 11-ABR-96	CUBOS 15X15	1	65900	225.00	293	289	3.70	1.28	6.00
		2	64700	225.00	288				
		3	64300	225.00	286				
	CILINDROS 15X30	1	49860	182.65	273	272	4.95	1.82	
		2	48800	182.65	267				
		3	50600	182.65	277				
C-2 17-ABR-96	CUBOS 15X15	1	89700	225.00	399	406	13.49	3.32	15.16
		2	89400	225.00	397				
		3	94800	225.00	421				
	CILINDROS 15X30	1	67200	181.94	369	352	14.80	4.20	
		2	62700	181.46	346				
		3	62100	181.46	342				
C-3 22-ABR-96	CUBOS 15X15	1	75600	225.00	336	334	6.05	1.81	9.48
		2	73600	225.00	327				
		3	76200	225.00	339				
	CILINDROS 15X30	1	55700	181.46	307	305	2.04	0.67	
		2	55200	182.25	303				
		3	55500	181.86	305				
C-4 26-ABR-96	CUBOS 15X15	1	79000	225.00	351	346	7.14	2.07	12.42
		2	76000	225.00	338				
		3	78500	225.00	349				
	CILINDROS 15X30	1	56300	181.86	310	308	9.52	3.09	
		2	54200	182.25	297				
		3	57500	181.86	316				
C-6-A 13-MAY-96	CUBOS 15X15	1	96300	225.00	428	422	6.31	1.49	21.65
		2	93500	225.00	416				
		3	95300	225.00	424				
	CILINDROS 15X30	1	62500	182.25	343	347	5.46	1.57	
		2	62800	181.86	345				
		3	64400	182.25	353				
C-7 16-MAY-96	CUBOS 15X15	1	103400	225.00	460	459	6.46	1.41	15.16
		2	104700	225.00	465				
		3	101800	225.00	452				
	CILINDROS 15X30	1	72600	181.46	400	399	4.72	1.18	
		2	73200	181.86	403				
		3	71700	182.26	393				
C-8 29-MAY-96	CUBOS 15X15	1	46800	225.00	208	203	5.73	2.82	12.02
		2	46100	225.00	205				
		3	44300	225.00	197				
	CILINDROS 15X30	1	33100	181.46	182	181	1.60	0.88	
		2	32590	181.46	180				
		3	33230	182.26	182				
C-9 3-JUN-96	CUBOS 15X15	1	55900	225.00	248	244	4.47	1.83	6.82
		2	53900	225.00	240				
		3	55100	225.00	245				
	CILINDROS 15X30	1	42000	181.46	231	229	2.78	1.22	
		2	41600	181.86	229				
		3	40900	181.06	226				

Tabla 17 Resultados obtenidos de los ensayos efectuados a 28 días en las mezclas con cemento tipo I, elaboradas durante la primera etapa de evaluación del método propuesto.

RESULTADOS DE ENSAYES A ESPÉCIMENES:

CÚBICOS DE 15x15x15 cm.

CILÍNDRICOS DE 15x30 cm.

TIPO DE CURADO: ASTM C 192

TIPO DE PRUEBA: COMPRESIÓN

EDAD DE PRUEBA: 28 DÍAS.

MEZCLAS CON CEMENTO: TIPO I.

No. Colado	Tipo de Espécimen	No. Espécimen	Carga Directa (kg)	Área (cm ²)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)	Resistencia Media (kg/cm ²)	Desviación Estándar (kg/cm ²)	Coefficiente de variación (%)	Porcentaje de incremento de resistencia (%)
C-10 20-JUN-96	CUBOS 15X15	1	106250	225.00	472	472	11.78	2.49	21.16
		2	103600	225.00	460				
		3	108900	225.00	484				
	CILINDROS 15X30	1	68700	181.86	383	390	7.51	1.93	
		2	71900	180.66	398				
		3	70400	181.46	388				
C-11 24-JUN-96	CUBOS 15X15	1	114900	225.00	511	501	11.96	2.39	7.85
		2	113500	225.00	504				
		3	109700	225.00	488				
	CILINDROS 15X30	1	83400	181.46	460	464	4.49	0.97	
		2	85200	181.86	469				
		3	84600	181.86	465				
C-12 1-JUL-96	CUBOS 15X15	1	98200	225.00	436	440	10.33	2.35	24.00
		2	97300	225.00	432				
		3	101700	225.00	452				
	CILINDROS 15X30	1	62700	181.46	346	355	8.45	2.38	
		2	65900	182.26	362				
		3	64700	180.66	358				
C-13 4-JUL-96	CUBOS 15X15	1	115900	225.00	515	511	4.01	0.78	20.49
		2	114100	225.00	507				
		3	114900	225.00	511				
	CILINDROS 15X30	1	76300	182.26	419	424	8.59	2.03	
		2	76300	181.86	420				
		3	78400	180.66	434				
C-14 9-JUL-96	CUBOS 15X15	1	94100	225.00	418	405	12.21	3.02	28.80
		2	88800	225.00	395				
		3	90200	225.00	401				
	CILINDROS 15X30	1	59300	181.86	326	314	15.34	4.88	
		2	58100	181.86	319				
		3	54100	182.26	297				
C-15 11-JUL-96	CUBOS 15X15	1	106500	225.00	473	480	10.27	2.14	15.16
		2	106700	225.00	474				
		3	110600	225.00	492				
	CILINDROS 15X30	1	76400	182.26	419	417	2.42	0.58	
		2	75200	181.46	414				
		3	75500	181.46	416				
C-16 07-AGO-96	CUBOS 15X15	1	69700	225.00	310	309	7.18	2.33	12.02
		2	67700	225.00	301				
		3	70900	225.00	315				
	CILINDROS 15X30	1	50100	182.26	275	275	0.91	0.33	
		2	50400	182.26	277				
		3	49800	181.06	275				
C-17 12-AGO-96	CUBOS 15X15	1	84400	225.00	375	373	3.87	1.04	10.24
		2	83000	225.00	369				
		3	84600	225.00	376				
	CILINDROS 15X30	1	61200	181.46	337	339	3.43	1.01	
		2	61000	181.46	336				
		3	62300	181.86	343				

Tabla 18 Proporcionamientos y características de las mezclas elaboradas en la segunda etapa de evaluación del método propuesto.

TIPO DE CEMENTO: PORTLAND TIPO I	DESIGNACIÓN DE LAS MEZCLAS				
	C-20	C-21	C-19	C-22	C-18
Proporcionamientos empleados					
CEMENTO (kg/m ³)	236.45	235.36	237.42	237.01	235.62
AGUA (MEZCLADO NETO) (kg/m ³)	189.17	190.20	192.18	189.06	192.30
ARENA (100%) SECA (kg/m ³)	848.71	844.82	852.23	850.77	845.76
GRAVA (100%) SECA (kg/m ³)	972.21	967.75	976.24	974.53	968.82
ADITIVO REDUCTOR DE AGUA (4 ml/kg de cemento) (kg/m ³)	.....	.....	.....	.....	.....
REDUCCIÓN DE AGUA (%)	.....	.....	.....	.....	.....
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.800	0.808	0.809	0.798	0.816
RELACIÓN ARENA-GRAVA (%-%)	46.6-53.4	46.6-53.4	46.6-53.4	46.6-53.4	46.6-53.4
Características de las mezclas					
REVENIMIENTO (cm)	8.00	8.60	8.13	7.80	7.97
PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	2282.18	2273.83	2293.92	2286.99	2278.22
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.80	2.00	1.70	2.10	1.70
TEMPERATURA INICIAL (°C)	15.0	15.0	17.1	17.9	23.8

C-20 = Recipiente de curado autógeno expuesto a una temperatura ambiente promedio de 12°C

C-21 = Recipiente de curado autógeno expuesto a una temperatura ambiente promedio de 12°C

C-19 = Recipiente de curado autógeno a la intemperie pero protegido del sol

C-22 = Recipiente de curado autógeno expuesto al sol directo

C-18 = Recipiente de curado autógeno expuesto al sol directo

Nota: las 5 mezclas son repetitivas del colado C-16

Tabla 19 Análisis de los porcentajes de resistencia normal obtenidos aceleradamente como resultado de la aplicación del método propuesto.

ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES						
Designación del colado	Consumo de cemento (kg/m³)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA POR:			RESISTENCIA ACELERADA, EXPRESADA COMO POR CIENTO DE LA OBTENIDA A 28 DÍAS EN:	
		MÉTODO PROPUESTO CURADO AUTÓGENO 24 HORAS	ASTM C 192 CURADO NORMAL 28 DÍAS			
		CUBOS (kg/cm²)	CILINDROS (kg/cm²)	CUBOS (kg/cm²)	CILINDROS (%)	CUBOS (%)
MEZCLAS CON CEMENTO PUZOLÁNICO						
C-8	232.20	113	181	203	62.43	55.67
C-9	229.04	140	229	244	61.14	57.38
C-1	290.51	169	272	289	62.13	58.48
C-4	286.10	197	308	346	63.96	56.94
C-3	336.10	211	305	334	69.18	63.17
C-6-A	329.45	279	347	422	80.40	66.11
C-2	385.52	271	352	406	76.99	66.75
C-7	379.86	322	399	459	80.70	70.15
MEZCLAS CON CEMENTO TIPO I						
C-16	236.75	138	275	309	50.18	44.66
C-17	233.77	174	339	373	51.33	46.65
C-14	294.96	219	314	405	69.75	54.07
C-15	292.12	289	417	480	69.30	60.21
C-12	339.06	269	355	440	75.77	61.14
C-13	333.35	345	424	511	81.37	67.51
C-10	384.67	339	390	472	86.92	71.82
C-11	379.96	413	464	501	89.01	82.44

Tabla 20 Análisis comparativo de la influencia de la temperatura en cuanto a la magnitud del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba propuesto.

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS RESULTADOS DEL MÉTODO DE PRUEBA						
Designación del colado	Consumo de cemento (kg/m ³)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA POR:			RESISTENCIA ACELERADA, EXPRESADA COMO POR CIENTO DE LA OBTENIDA A 28 DÍAS EN:	
		MÉTODO PROPUESTO CURADO AUTÓGENO 24 HORAS	ASTM C 192 CURADO NORMAL 28 DÍAS		CILINDROS (%)	CUBOS (%)
		CUBOS (kg/cm ²)	CILINDROS (kg/cm ²)	CUBOS (kg/cm ²)		
COLADO C-16						
C-16	236.75	138	275	309	50.18	44.66
MEZCLAS REPETITIVAS DEL COLADO C-16						
C-20	236.45	107	270	298	39.63	35.91
C-21	235.36	105	263	296	39.92	35.47
C-19	237.42	117	260	285	45.00	41.05
C-22	237.01	115	266	282	43.23	40.78
C-18	235.62	152	260	282	58.48	53.90

C-20= Recipiente de curado autógeno expuesto a una temperatura ambiente promedio de 12°C.

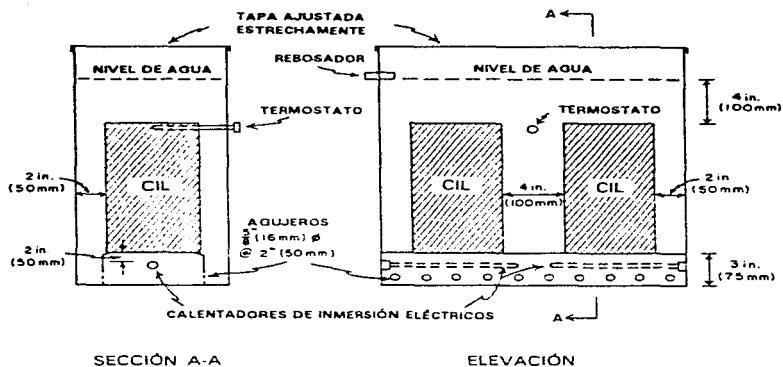
C-21= Recipiente de curado autógeno expuesto a una temperatura ambiente promedio de 12°C.

C-19= Recipiente de curado autógeno a la intemperie pero protegido del sol.

C-22= Recipiente de curado autógeno expuesto al sol directo.

C-18= Recipiente de curado autógeno expuesto al sol directo.

TANQUE DE CURADO PARA DOS CILINDROS

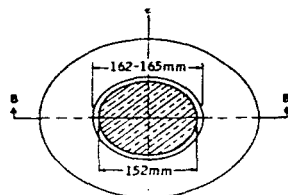


Nota:

El empleo de un aislante exterior en el tanque de curado acelerado, así como la utilización de un rebosador y una tapa para su sellado; son elementos indispensables únicamente cuando se aplica el método B (del agua hirviendo). El método A (del agua caliente) no requiere el uso de estos aditamentos para su adecuado funcionamiento.

Fig 1 Diseño de un tanque de curado acelerado, propuesto por la Norma ASTM C 684 para los métodos A y B de curado acelerado. (tomada de la referencia 1)

CONTENEDOR PARA UN CILINDRO



CONTENEDOR PARA DOS CILINDROS

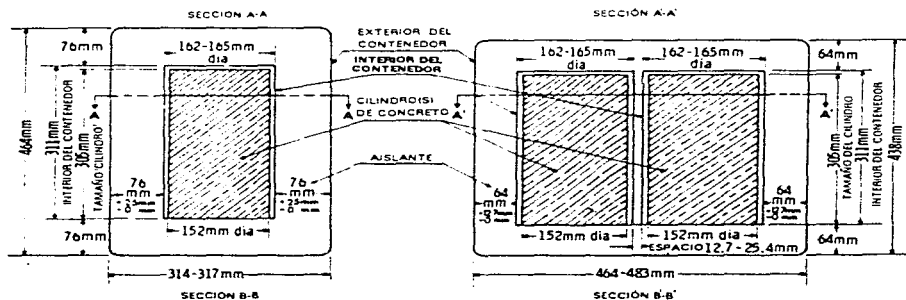
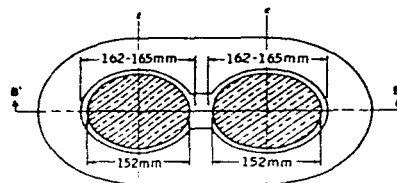
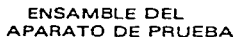


Fig 2

Contenedor para curado autógeno, propuesto por la Norma ASTM C 684 para el método C de curado acelerado. (tomada de la referencia 1)



SECCIÓN MOLDES DE PRUEBA

1. Barras de conexión	10. Contenedor del espécimen	19. Cable aislante
2. Cabezal	11. Contenedor del espécimen	20. Revestimiento de plástico
3. Base	12. Disco para soportar el cabezal	21. Conector eléctrico
4. Acumulador	13. Escudo de calor	22. Aislante de fibra de vidrio
5. Gato hidráulico	14. Tapa y pistón	23. Cubierta del contenedor
6. Medidor de presión	15. Junta	24. Pistón doble cerrado
7. Válvula del acumulador	16. Anillo de sellado	25. Sistema de circuitos
8. Válvula para el gato hidráulico	17. Especimen cilíndrico, núcleo del molde	26. Aparato para el engrasado
9. Contenedor del espécimen	18. Resistencia (elemento calentador)	

Diseño de un "aparato de curado", propuesto por la Norma ASTM C 684 para el método D de curado acelerado. (tomada de la referencia 1)

INFLUENCIA DEL CLORURO DE CALCIO EN LOS TIEMPOS DE FRAGUADO

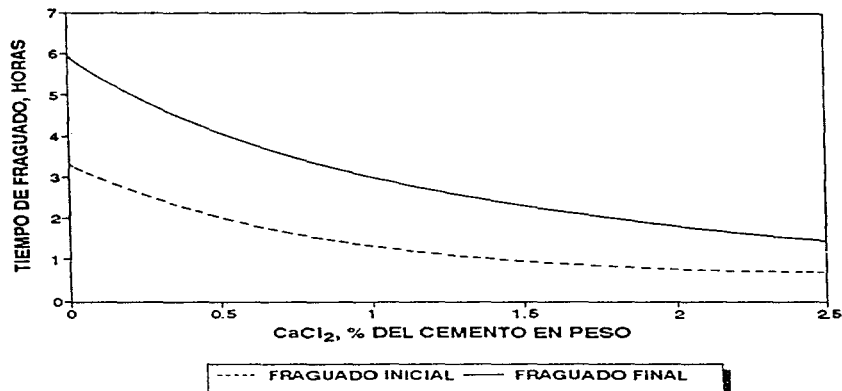


Fig 4 Disminución de los tiempos de fraguado en pastas de cemento para distintos contenidos de cloruro de calcio anhidro. (adaptada de la referencia 5)

EFFECTO DEL CLORURO DE CALCIO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

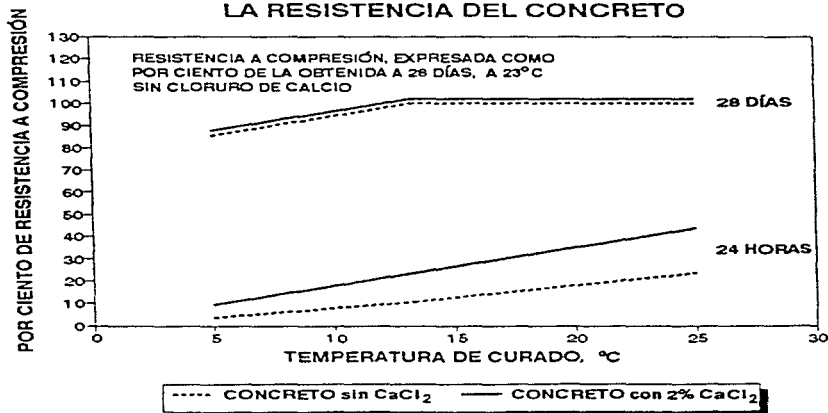


Fig 5 Efecto del cloruro de calcio (2%) en la adquisición de resistencia mecánica del concreto de acuerdo a la edad y temperatura de curado. (adaptada de la referencia 5)

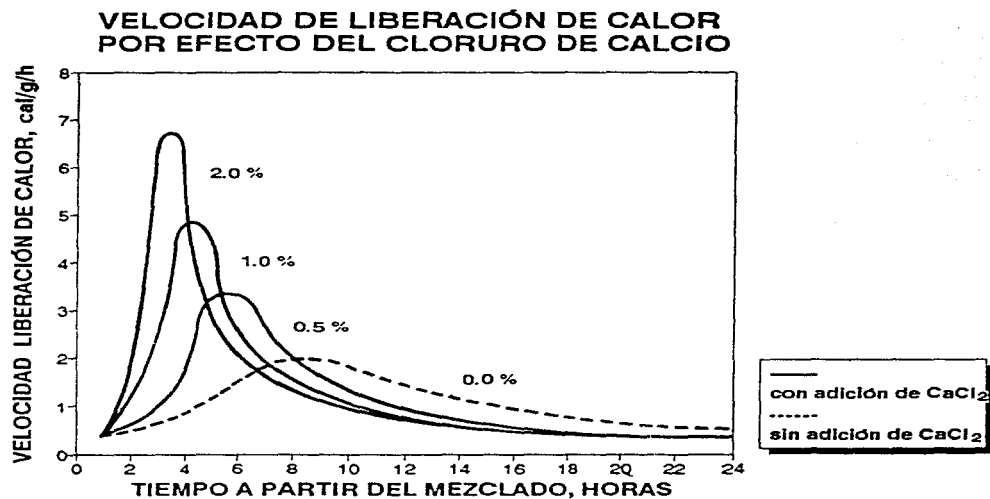


Fig 6

Aumento en la velocidad de desarrollo de calor de hidratación del cemento durante las primeras horas por efecto del cloruro de calcio. (tomada de la referencia 3)

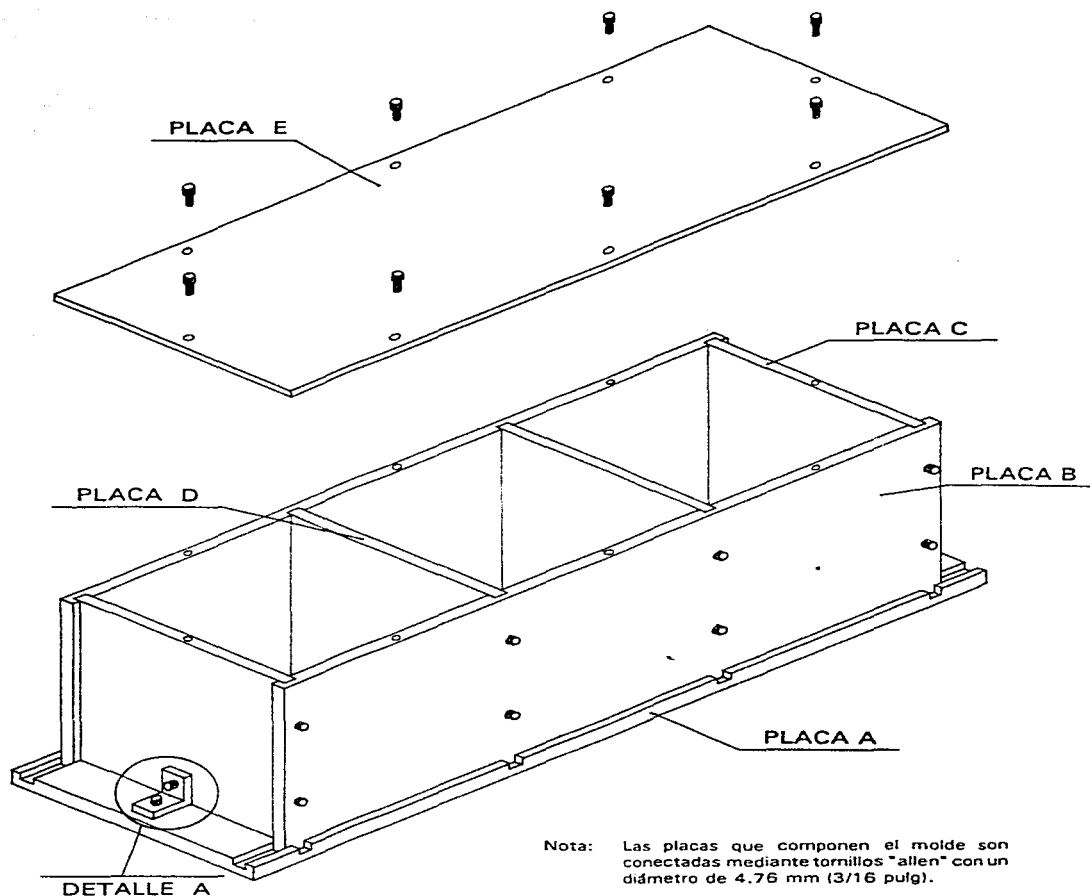
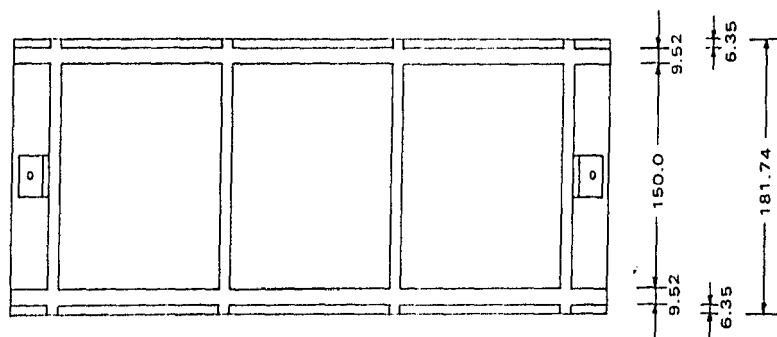
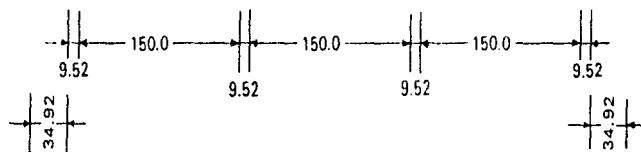


Fig 7

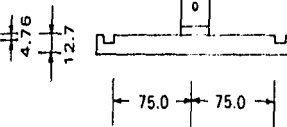
Molde triple metálico diseñado para la fabricación de especímenes cúbicos de acuerdo a como lo establece el método de prueba propuesto.



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

PLANO DE TALLER PLACA A

ACOTACIONES en mm

Fig 8

Planos de taller para la fabricación de un molde triple metálico provisto de tapa, tal y como se especifica en el método de prueba propuesto.

continúa

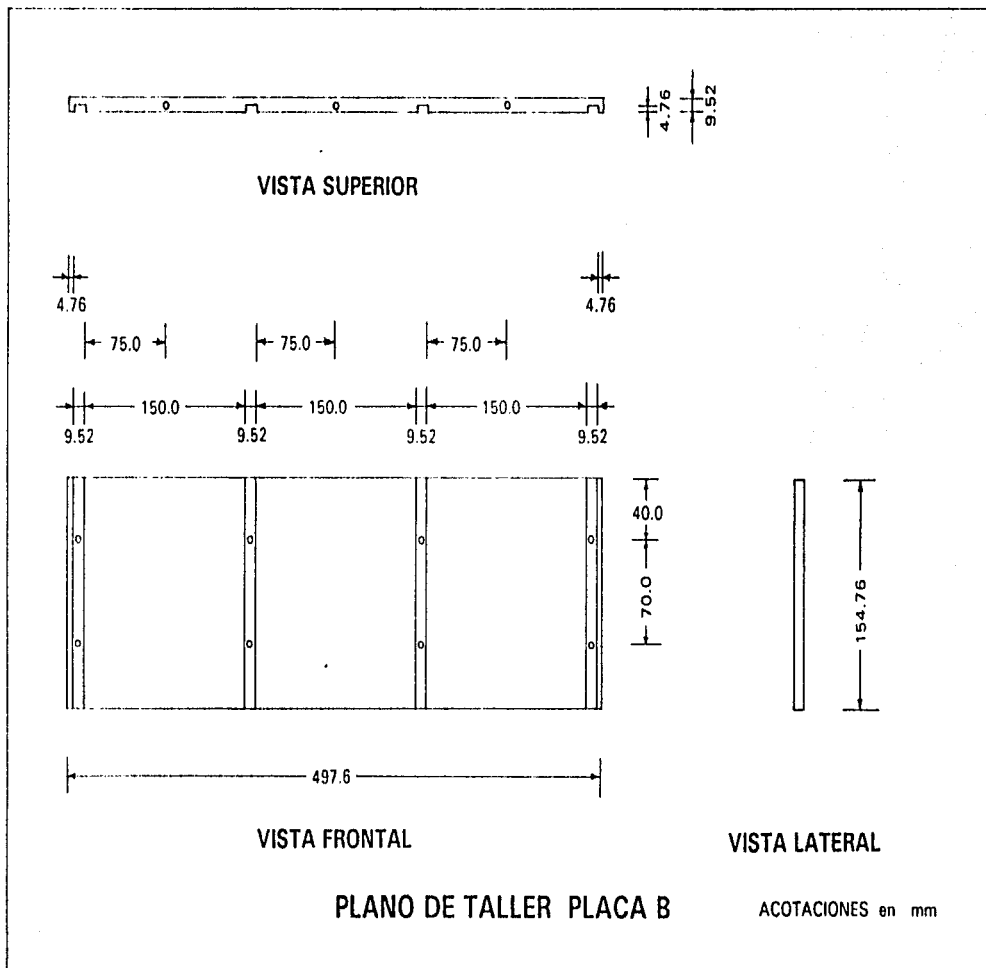
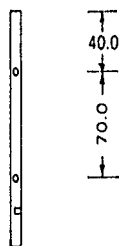


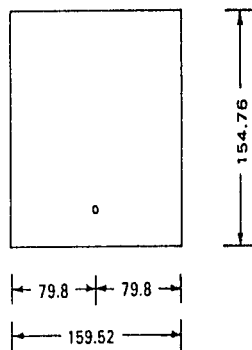
Fig 8 (continuación).

continúa...

VISTA SUPERIOR



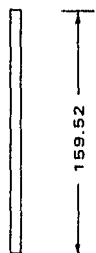
VISTA FRONTAL



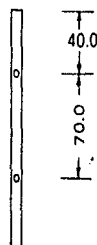
VISTA LATERAL

PLANO DE TALLER PLACA C

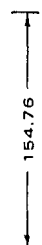
ACOTACIONES en mm



VISTA SUPERIOR



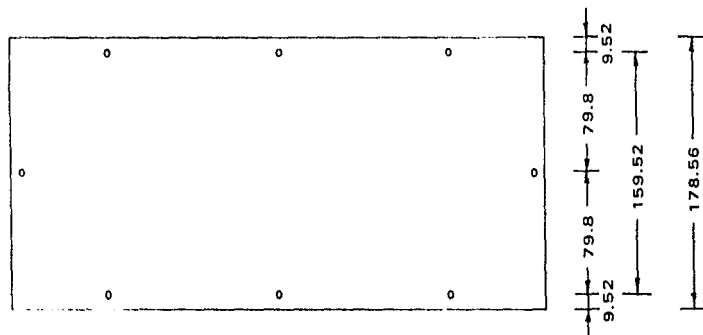
VISTA FRONTAL



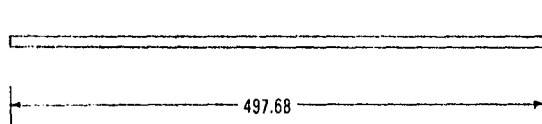
VISTA LATERAL

PLANO DE TALLER PLACA D

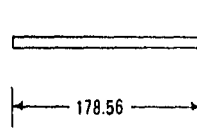
ACOTACIONES en mm



VISTA SUPERIOR



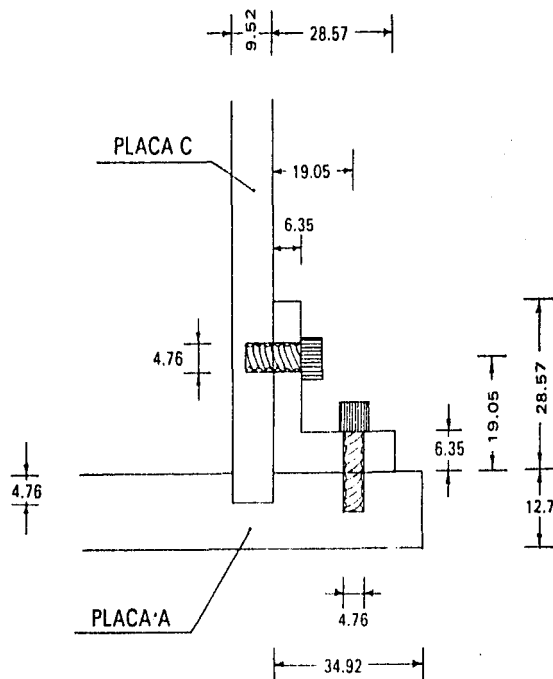
VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

PLANO DE TALLER PLACA E

ACOTACIONES en mm



ACOTACIONES EN mm

PLANO DE TALLER DETALLE A

Fig 8 (continuación).

LÍMITES PERMISIBLES DE PÉRDIDA DE TEMPERATURA, DURANTE LA CALIBRACIÓN

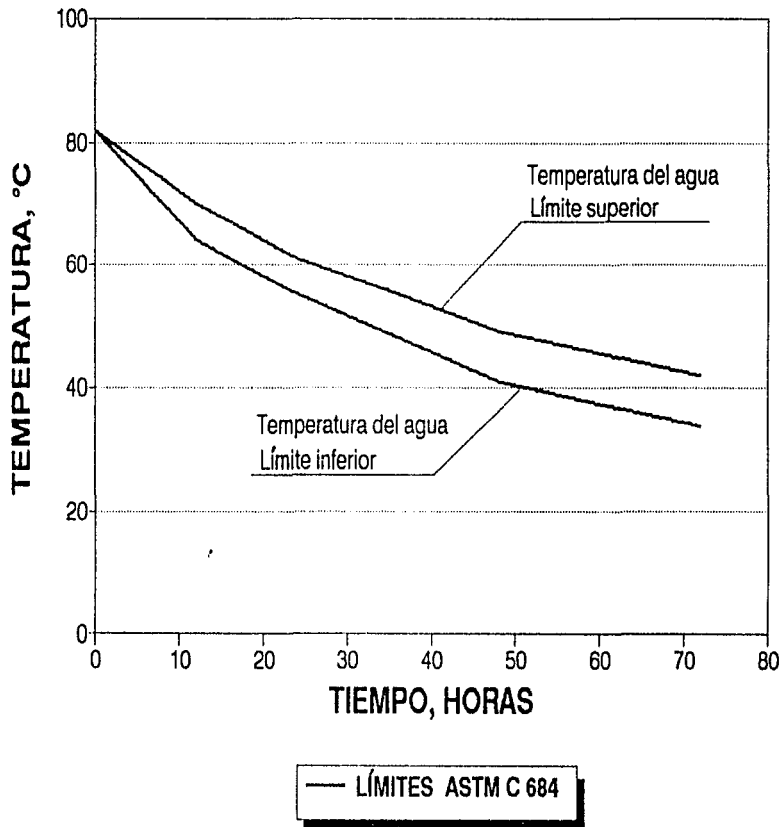
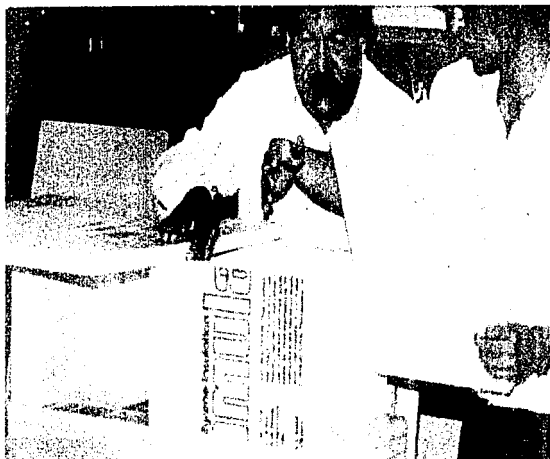


Fig 9

Límites establecidos por la Norma ASTM C 684 para el descenso de la temperatura del agua, durante la calibración del recipiente térmico de curado autógeno.

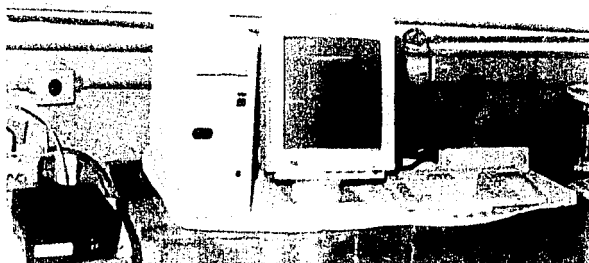


(a) Fabricación del recipiente térmico mediante placas de poliestireno extruido.

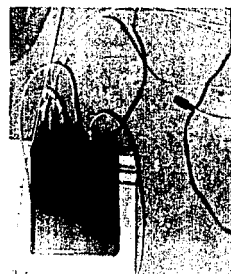


(b) Fabricación del recipiente térmico con poliuretano rígido espumado en sitio.

Fig 10 Proceso de construcción de los recipientes térmicos para el curado autógeno, de acuerdo a los requerimientos del método propuesto.



Equipo de cómputo ordinario.



Sistema adquirente de temperatura (8 canales).

Fig 11 Equipo específico para el monitoreo de las temperaturas, desarrollado por investigadores del área de instrumentación del Instituto de Ingeniería UNAM.

RESULTADO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE DE CURADO AUTÓGENO

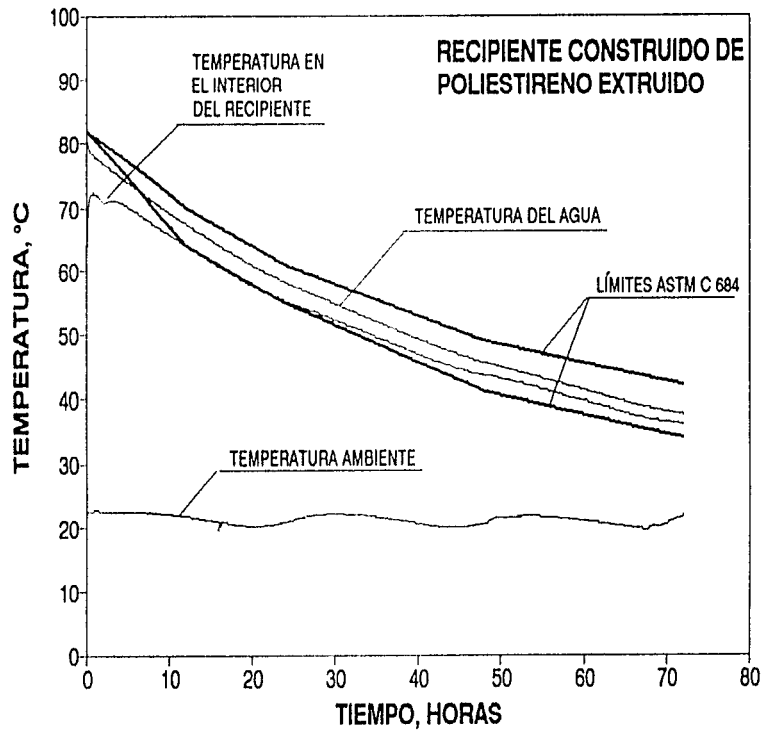


Fig 12 Resultado de la prueba de verificación de retención de calor, efectuada al recipiente térmico construido de poliestireno extruido.

RESULTADO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE DE CURADO AUTÓGENO

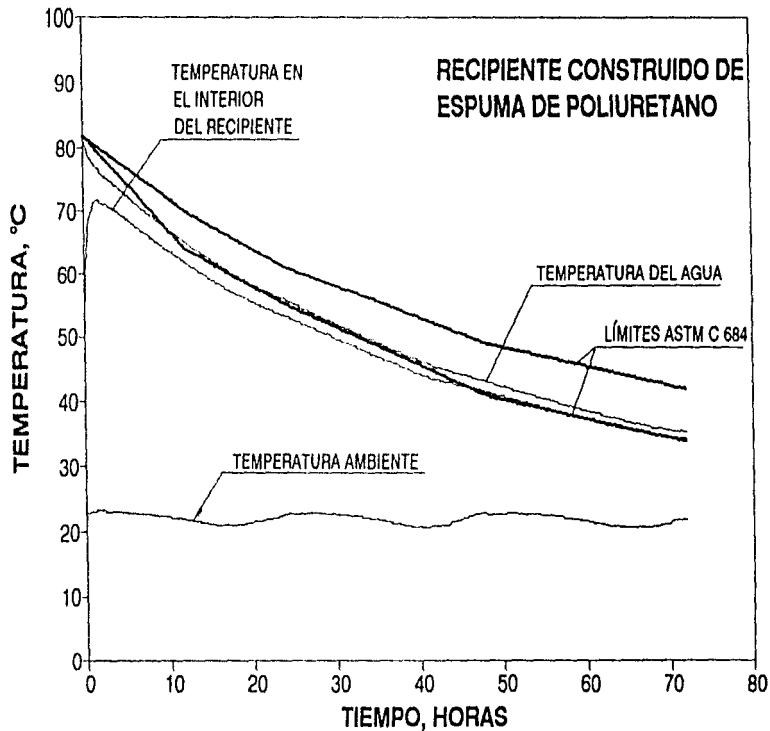


Fig 13

Resultado de la prueba de verificación de retención de calor, efectuada al recipiente térmico construido de espuma de poliuretano.

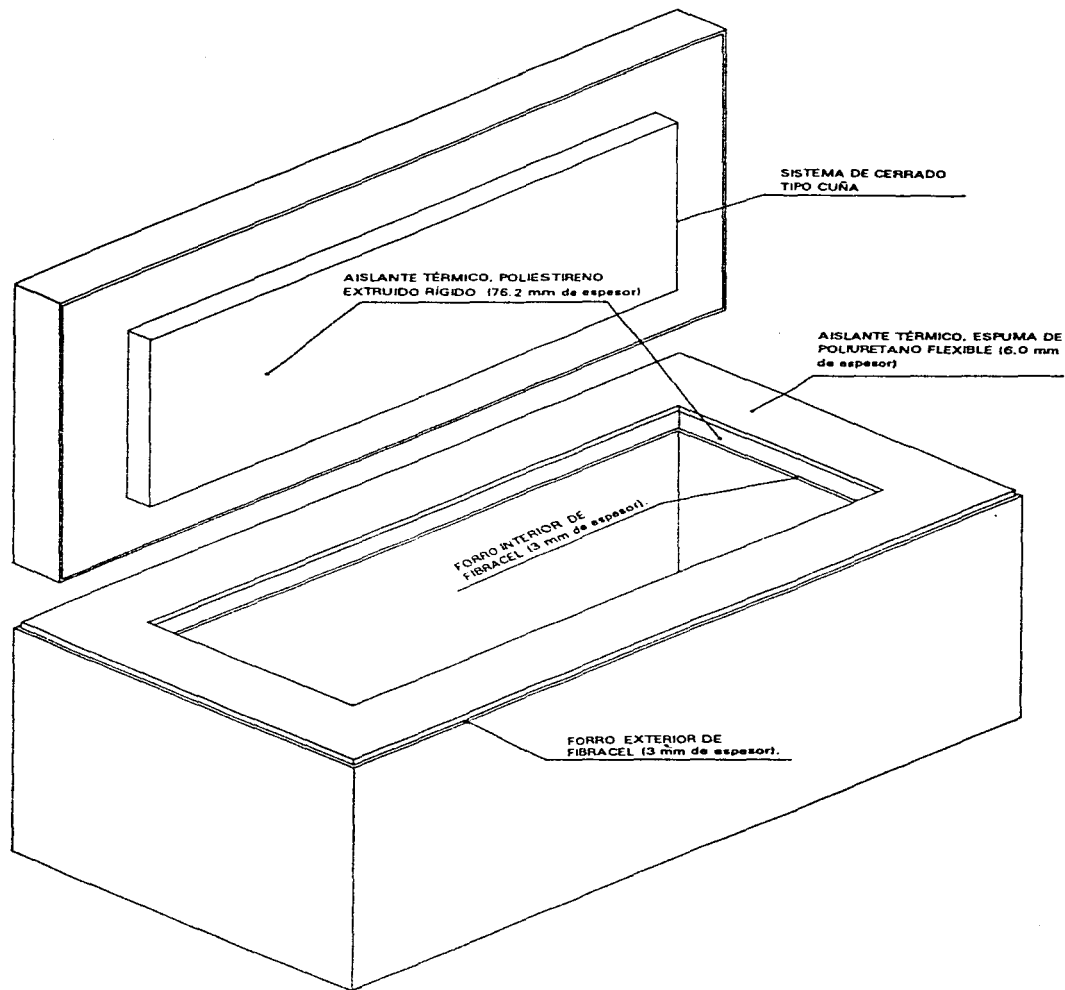


Fig 14

Recipiente de curado autógeno construido con poliestireno extruido rígido (aislante térmico), y utilizado para la evaluación del método de prueba propuesto.

Nota:

En esta figura no se especifican los sistemas para asir el molde, ni para asegurar el perfecto cerrado del recipiente de curado autógeno. Por lo que es necesario prever los aditamentos adecuados para facilitar y garantizar su correcta utilización.

Al momento de cerrar el recipiente, la espuma de poliuretano flexible se debe comprimir 50%

Acotaciones en mm

MOLDE PARA TRES
ESPECÍMENES
CÚBICOS COMPAÑEROS

TAPA DEL CONTENIDOR
AISLANTE TÉRMICO.
POLIESTIRENO EXTRUIDO RÍGIDO

SECCIÓN A-A

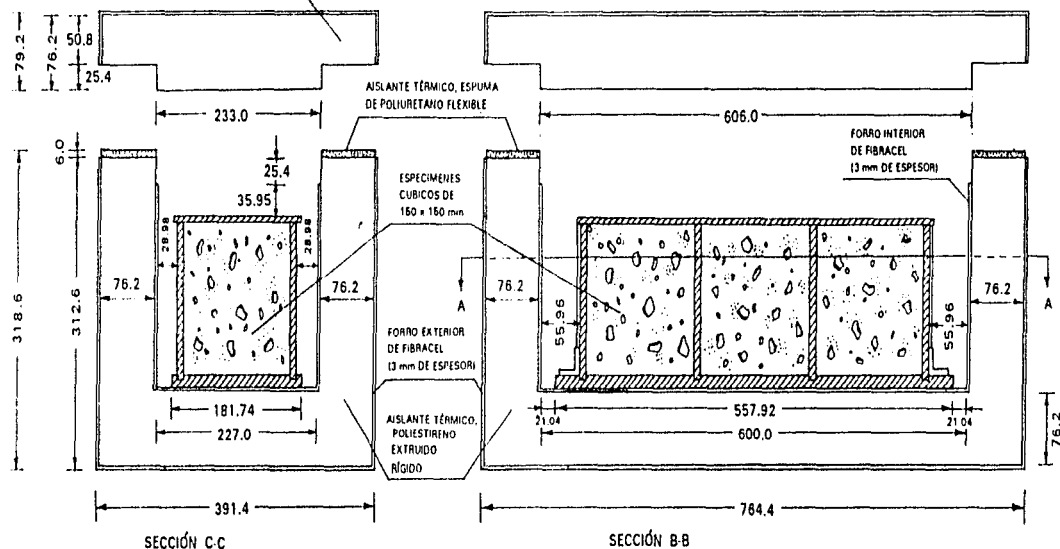


Fig 15

Acoplamiento del molde triple metálico y el recipiente de curado autógeno.



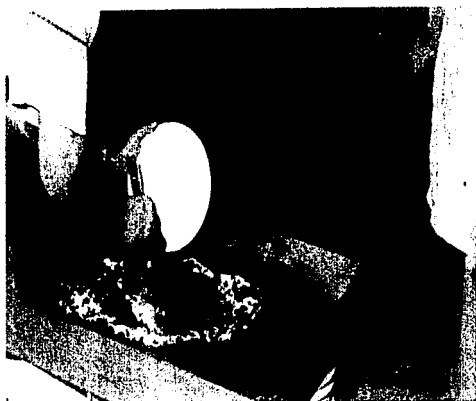
(a)



(b)



(c)



(d)

- (a) Obtención de la muestra de concreto (12.5 litros) mediante el llenado del recipiente cilíndrico.
- (b) Enrasado del recipiente cilíndrico.
- (c) Pesado del CaCl_2 en la balanza de laboratorio (balanza con resolución de 0.1 gramo).
- (d) Incorporación del CaCl_2 a la muestra de concreto.
- (e) Homogeneización de la muestra de concreto.
- (f) Colado de los tres especímenes cúbicos.
- (g) Colocación de la tapa al molde triple.
- (h) Colocación del molde dentro de una bolsa de polietileno.
- (i) Introducción del molde en el recipiente de curado autógeno y amarrado de la bolsa de polietileno.
- (j) Colocación de la tapa del recipiente, condición en la que permanece durante el período de curado.
- (k) Descimbrado de los especímenes.
- (l) Ensayo de los especímenes.



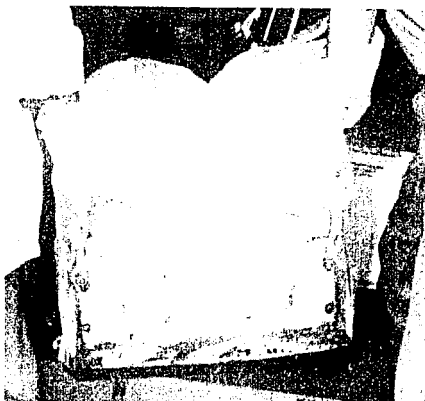
(e)



(f)



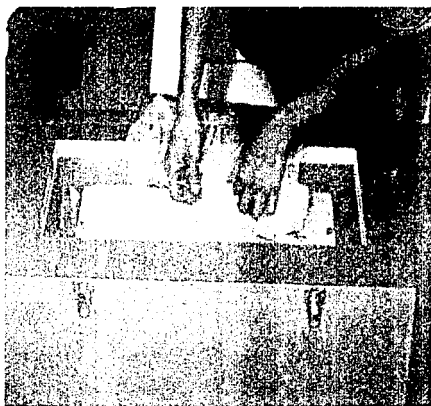
(g)



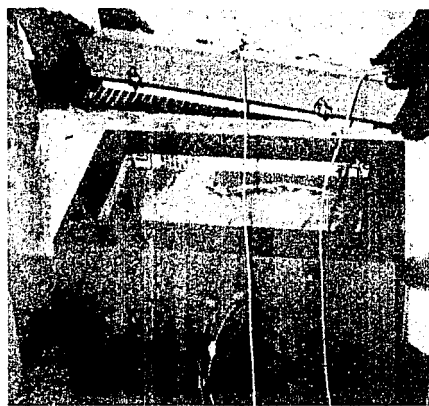
(h)

Fig 16 (continuación).

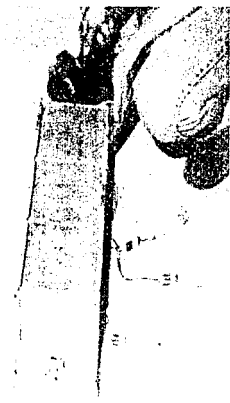
continúa...



(i)



(j)



(k)



(l)

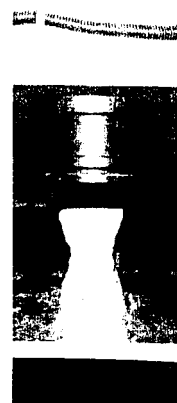


Fig 16 (continuación).

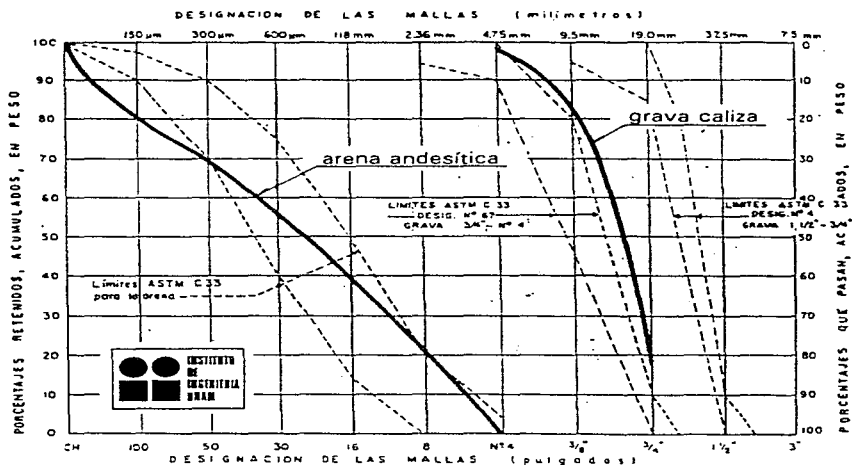


Fig 17

Curvas granulométricas obtenidas de las pruebas físicas realizadas a los materiales pétreos.

Grava clasificada	
1-a= 40%	
1-b= 60%	
A) Peso volumétrico seco y suelto	1505.8 kg/m ³
B) Peso volumétrico seco y compacto	1572.4 kg/m ³

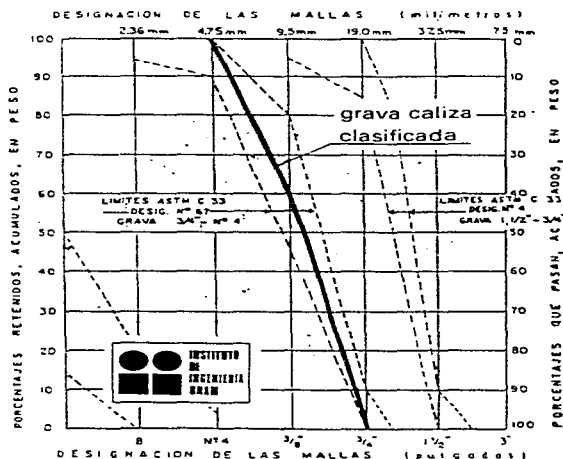


Fig 18

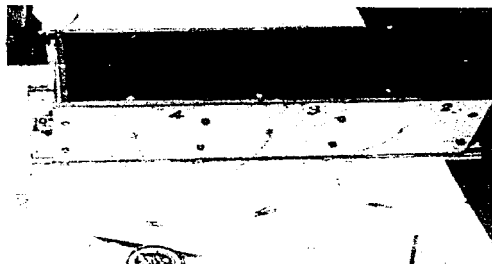
Ajuste efectuado a la curva granulométrica de la grava caliza para su utilización en el estudio.



(a)



(b)



(c)

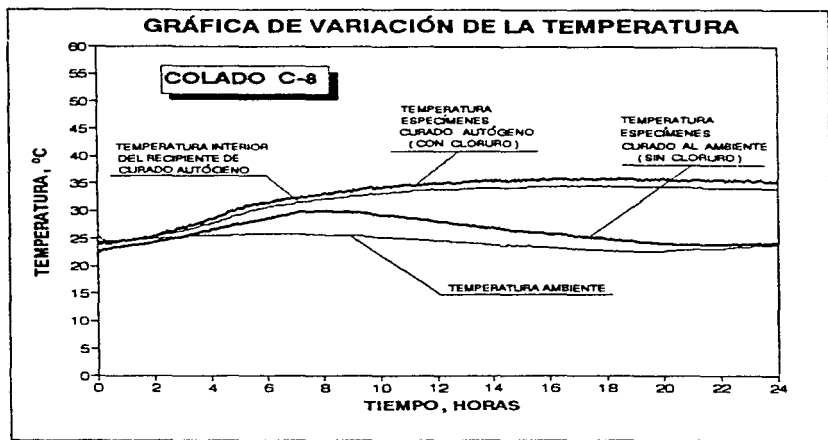


(d)

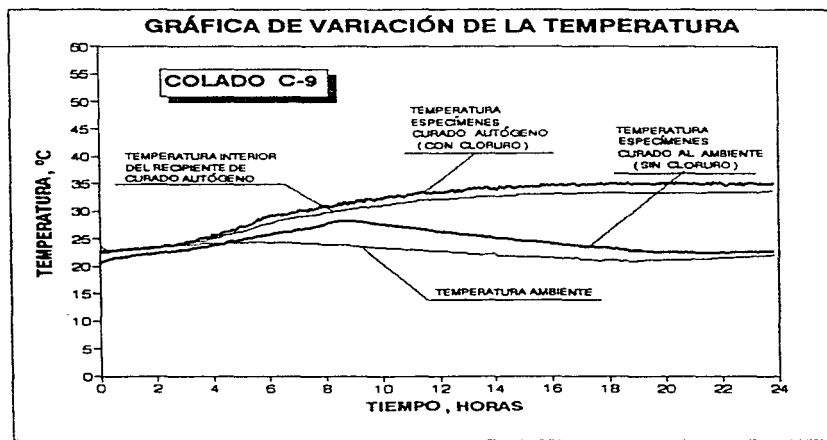
- (a) Preparación de los sensores para la instrumentación de los moldes.
- (b) Colocación de sensores en los moldes triples.
- (c) molde instrumentado.
- (d) Conexión de los sensores de temperatura previo a la realización de un colado.

Fig 19

Proceso de instrumentación efectuado para el monitoreo de la temperatura de los especímenes de concreto y la del medio ambiente.



a) Consumo de cemento = 232 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.

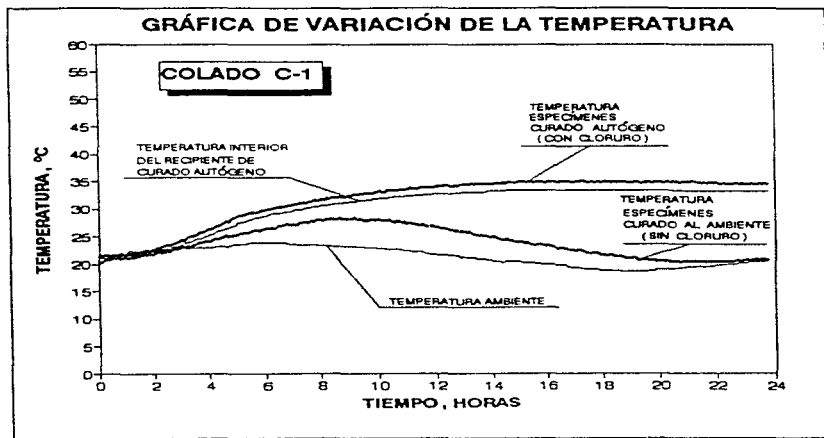


b) Consumo de cemento = 229 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.

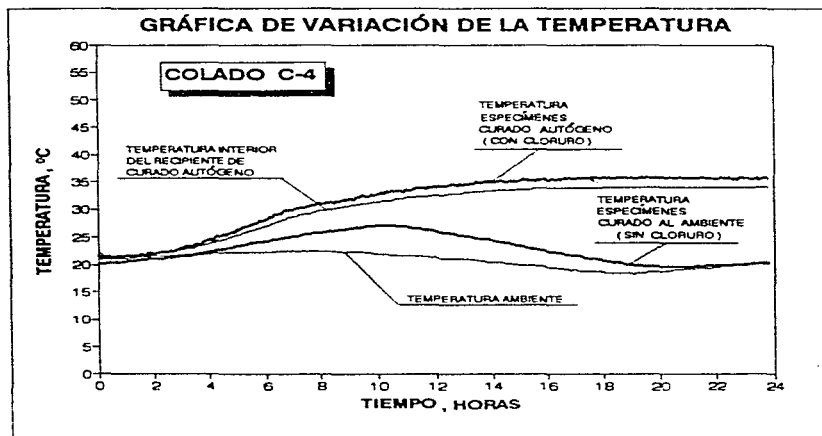
Fig 20

Gráficas de variación de la temperatura, obtenidas durante el desarrollo del método de prueba propuesto, en mezclas elaboradas con cemento portland-puzolana.

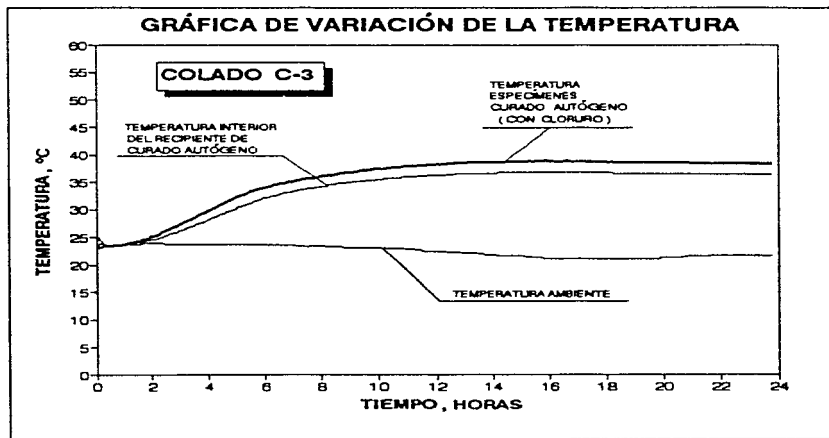
continúa...



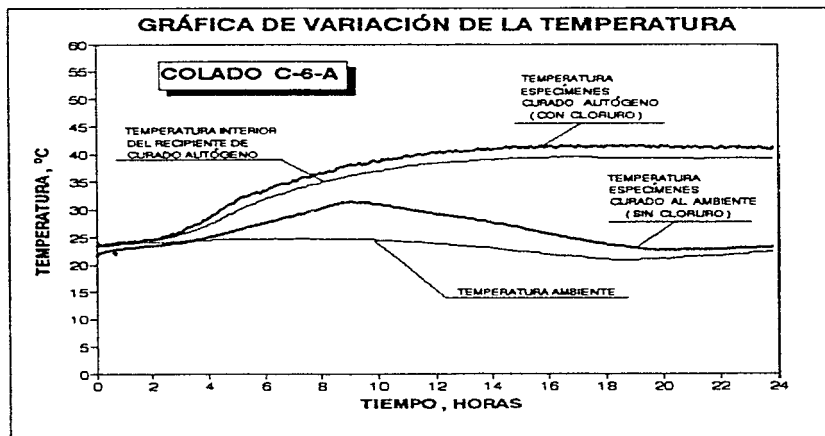
c) Consumo de cemento = 290 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.



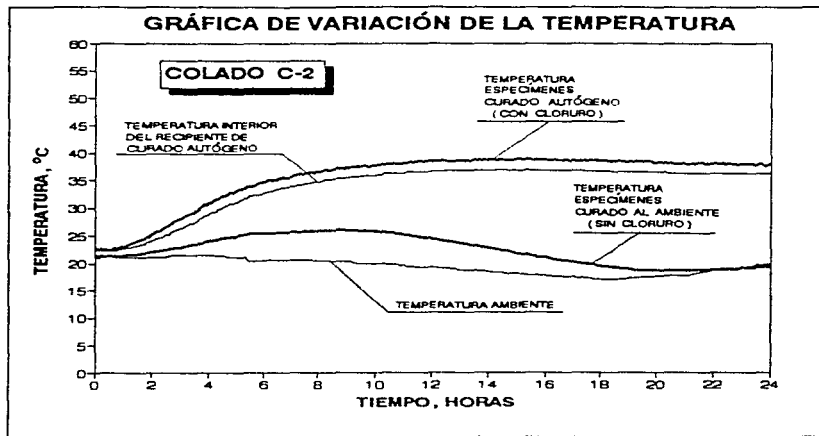
d) Consumo de cemento = 286 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.



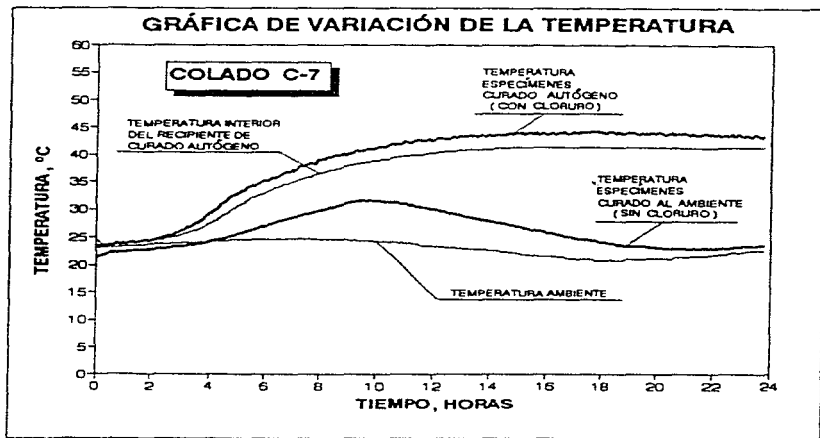
e) Consumo de cemento = 336 kg/m³, sin aditivo reductor de agua.



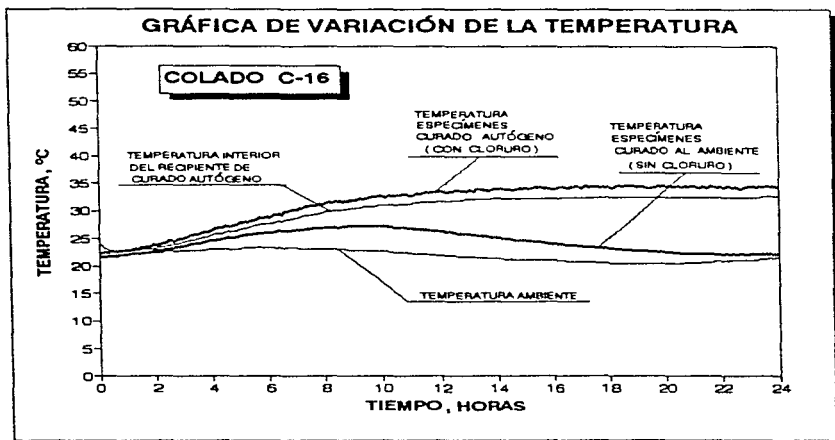
f) Consumo de cemento = 330 kg/m³, con aditivo reductor de agua.



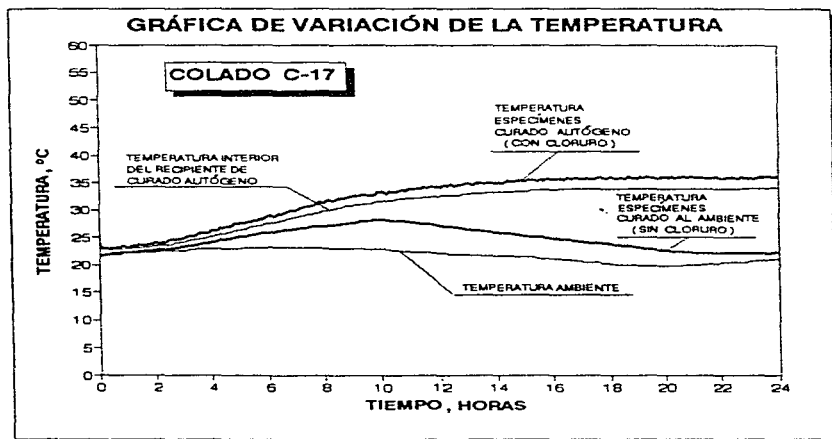
g) Consumo de cemento = 386 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.



h) Consumo de cemento = 380 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.



a) Consumo de cemento = 237 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.

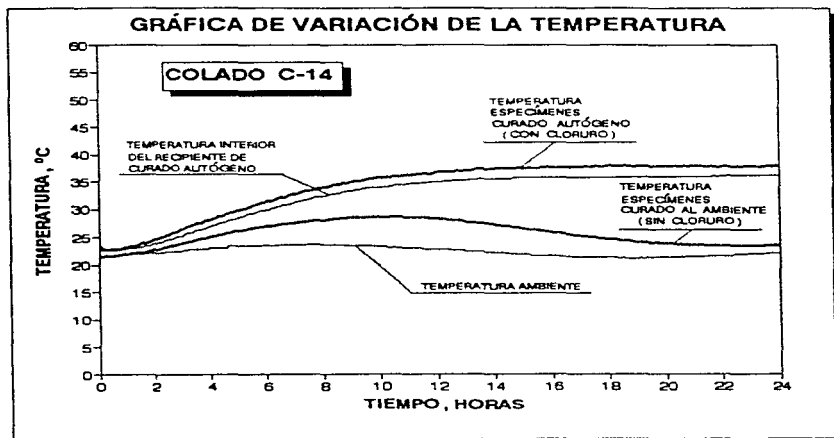


b) Consumo de cemento = 234 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.

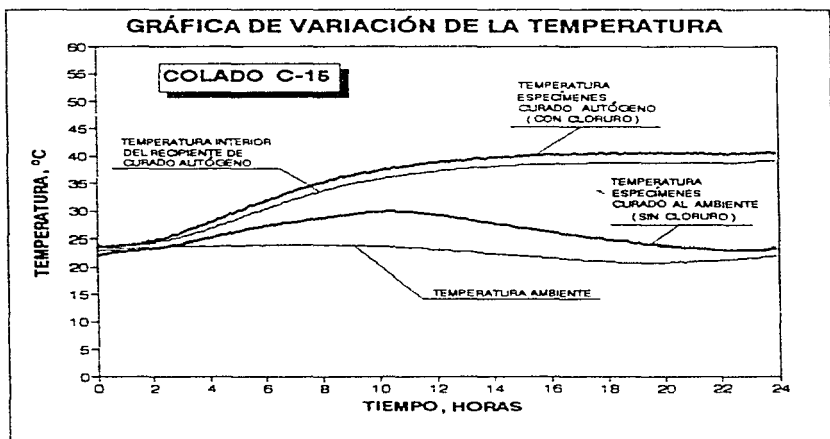
Fig 21

Gráficas de variación de la temperatura, obtenidas durante el desarrollo del método de prueba propuesto, en mezclas elaboradas con cemento portland tipo I.

continúa...



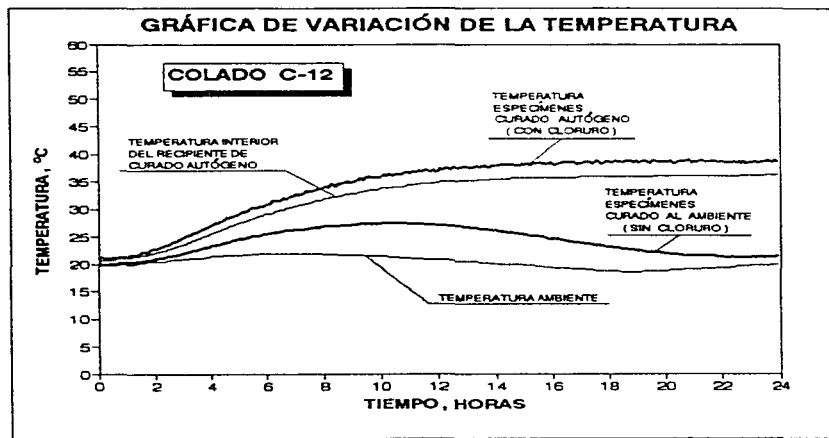
c) Consumo de cemento = 295 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.



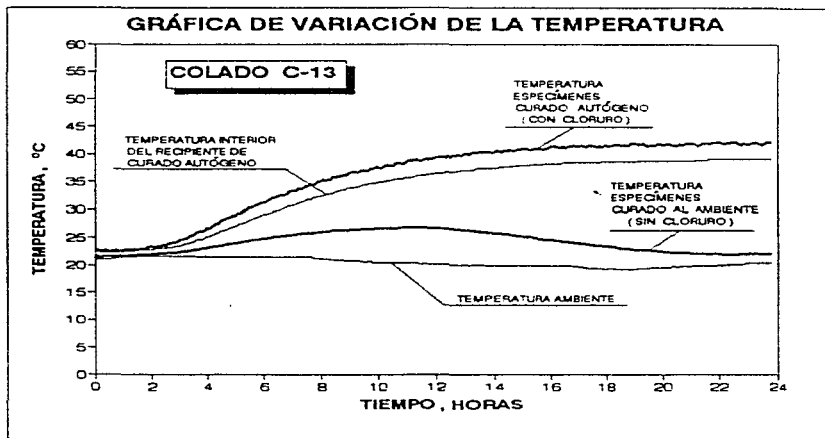
d) Consumo de cemento = 292 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.

Fig 21 (continuación).

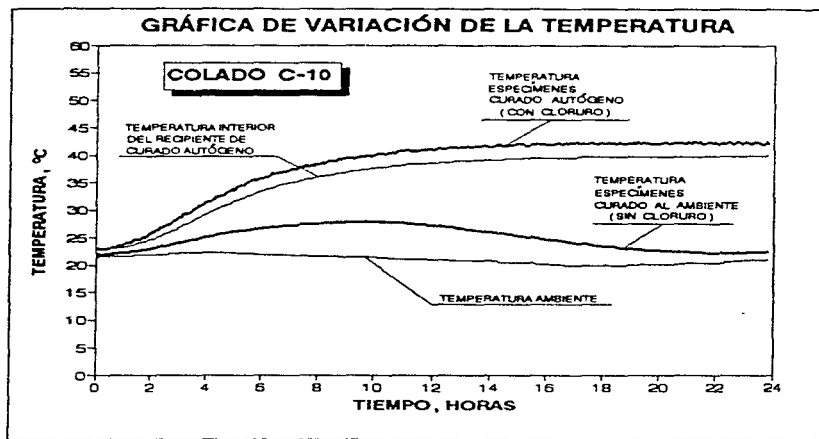
continúa...



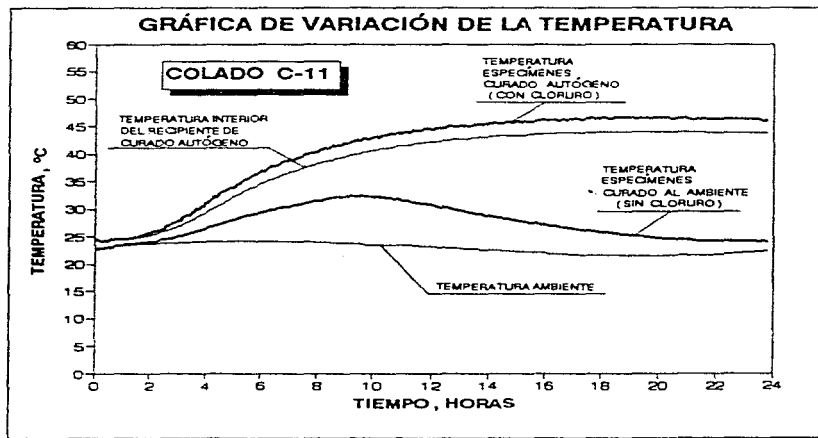
e) Consumo de cemento = 339 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.



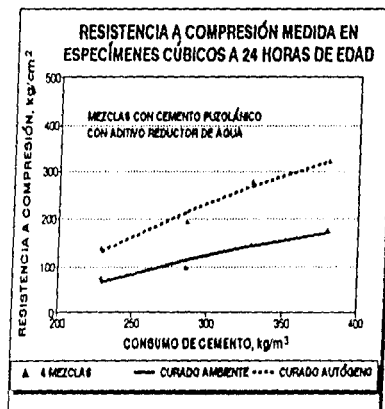
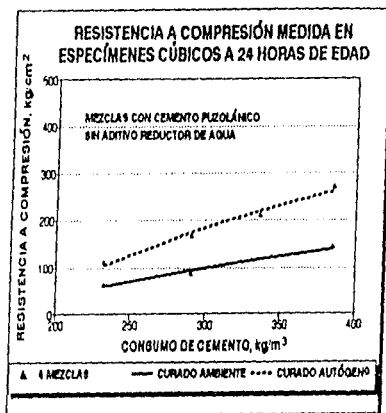
f) Consumo de cemento = 333 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.



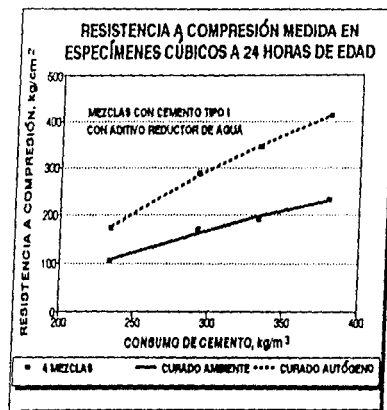
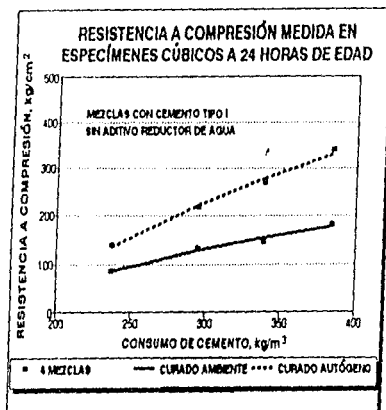
g) Consumo de cemento = 385 kg/m^3 , sin aditivo reductor de agua.



h) Consumo de cemento = 380 kg/m^3 , con aditivo reductor de agua.



- a) En las mezclas con cemento puzolánico se observó un porcentaje de incremento en la resistencia a compresión más o menos constante entre 80 y 90%.



- b) En las mezclas con cemento tipo I se observó un porcentaje de incremento en la resistencia a compresión desde 55 hasta 85%, aumentando con el consumo de cemento.

Fig 22 Incremento en la resistencia a compresión de especímenes cúbicos como resultado de la aplicación de método de prueba propuesto.

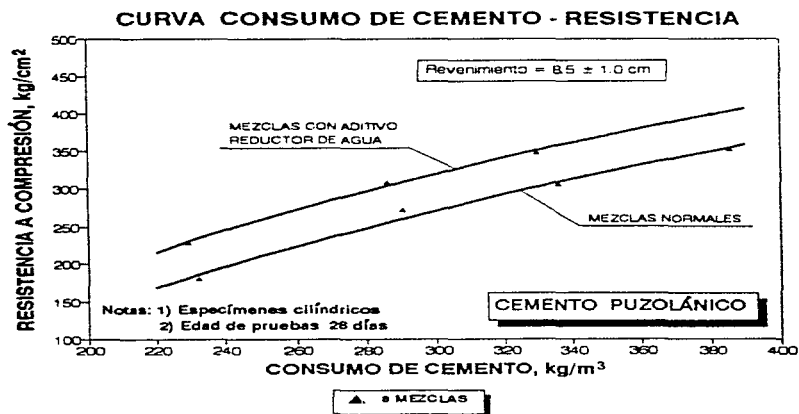


Fig 23

Variación de la resistencia a compresión con el consumo de cemento puzolánico (mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación).

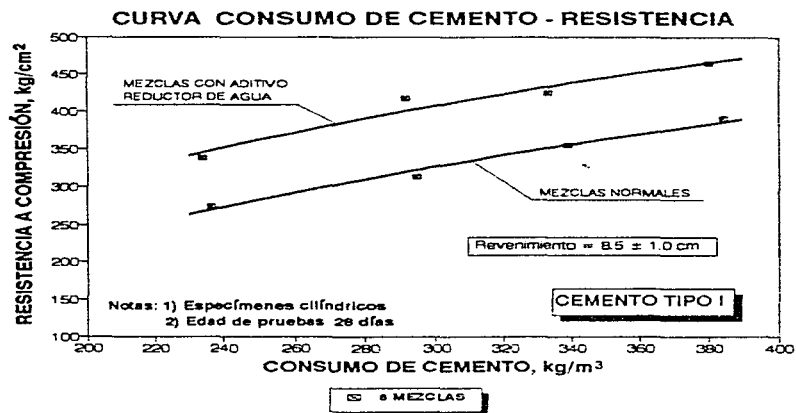


Fig 24

Variación de la resistencia a compresión con el consumo de cemento tipo I (mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación).

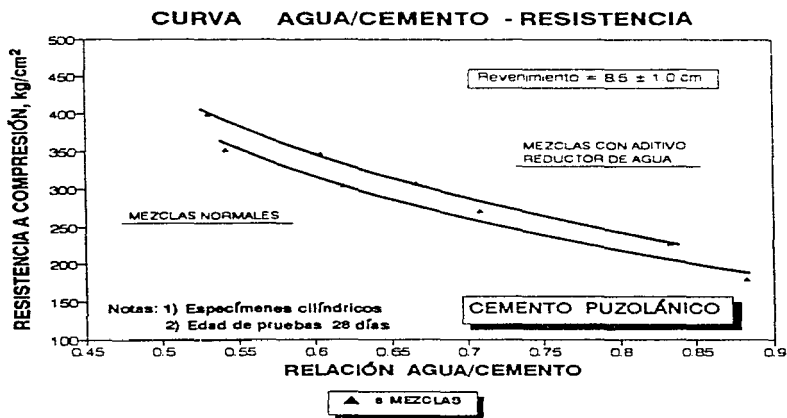


Fig 25

Variación de la resistencia a compresión con la relación agua/cemento (mezclas con cemento puzolánico elaboradas en la primera etapa de evaluación).

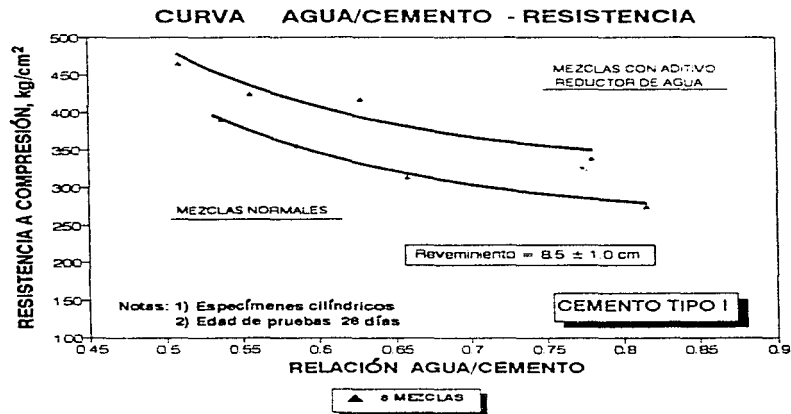


Fig 26

Variación de la resistencia a compresión con la relación agua/cemento (mezclas con cemento tipo I elaboradas en la primera etapa de evaluación).

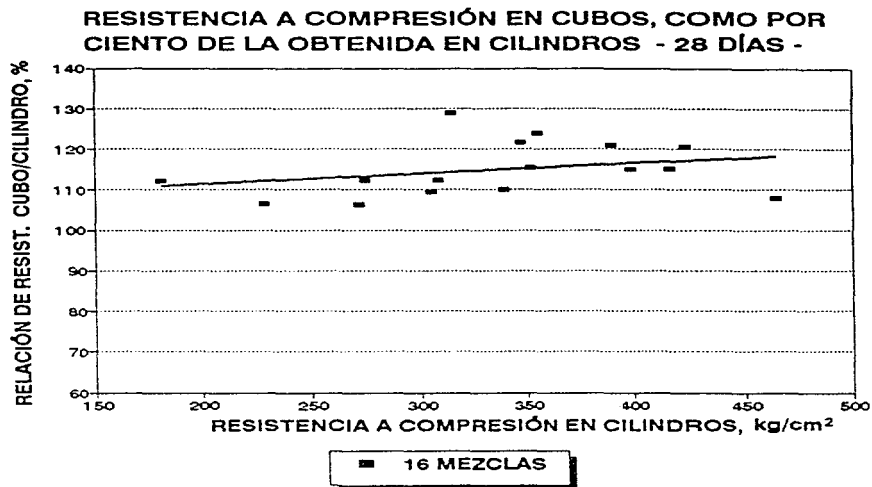
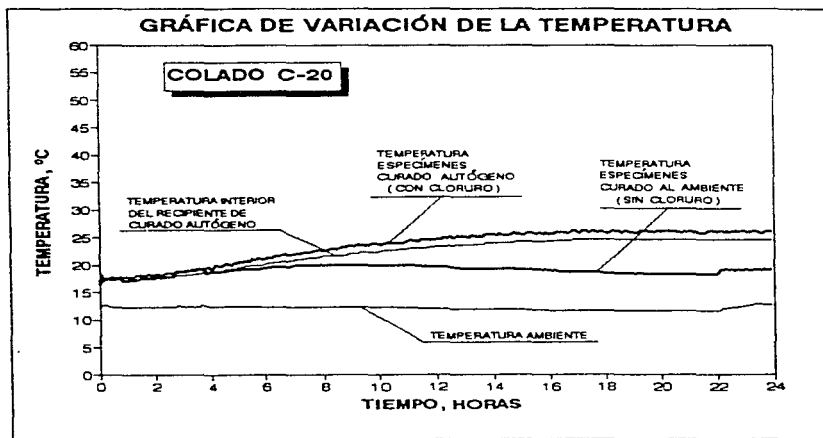
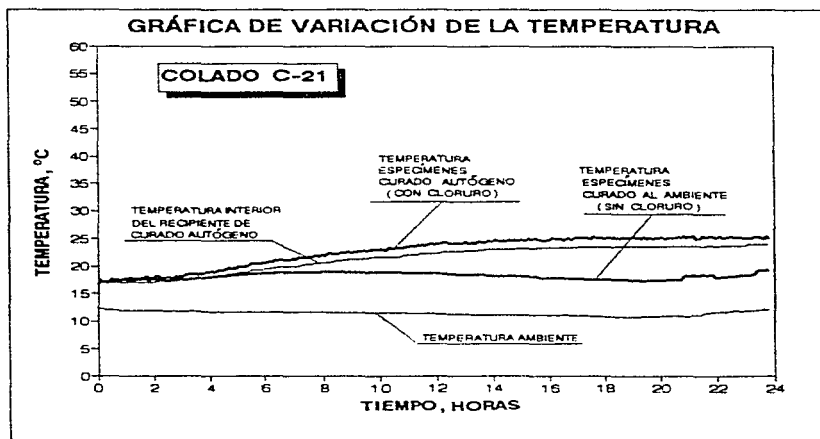


Fig 27

Comparación de la resistencia a compresión a 28 días (curado estándar) obtenida en especímenes cúbicos y cilíndricos.



- a) Bajo condiciones de temperatura tendientes a simular las características climáticas de invierno usuales en la localidad.

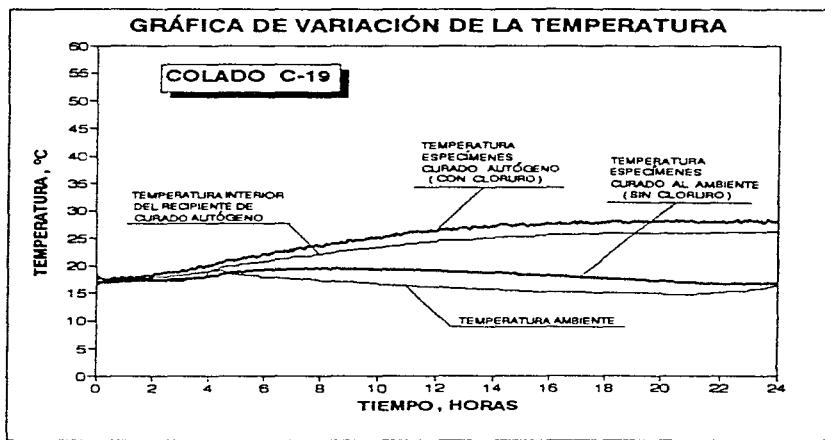


- b) Bajo condiciones de temperatura tendientes a simular las características climáticas de invierno usuales en la localidad.

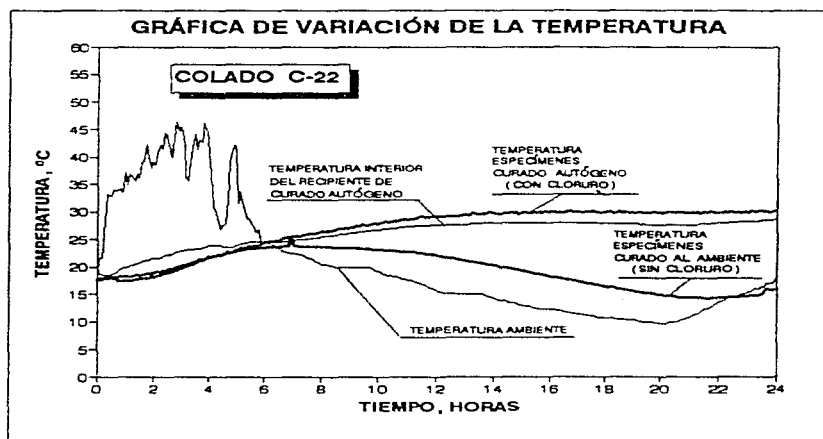
Fig 28

Gráficas de variación de la temperatura, obtenidas durante el desarrollo del método de prueba propuesto, en mezclas elaboradas bajo diferentes condiciones ambientales.

continúa...



- c) En condiciones de intemperie, pero protegida del sol.

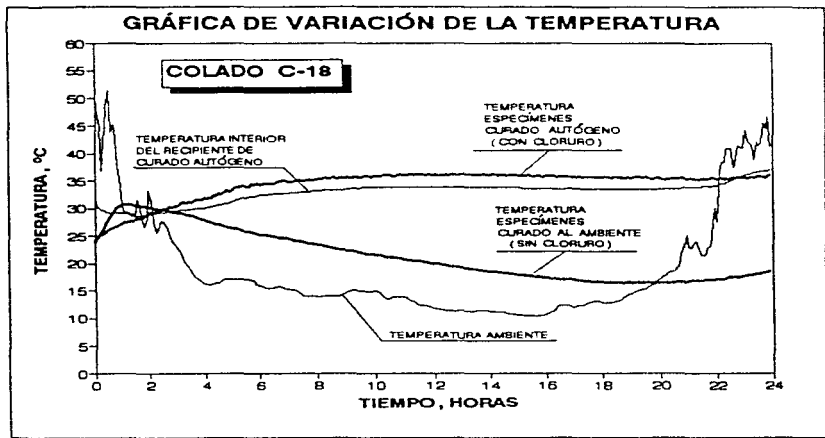


- d) A la intemperie, sometida a diferentes condiciones ambientales; sol, viento, frío, etc.

Fig 28

(continuación).

continúa...



- e) A la intemperie, sometida a diferentes condiciones ambientales: sol, viento, frío, etc.

Fig 28 (continuación).

RESISTENCIA ACELERADA EN CUBOS (24 HORAS) COMO PORCENTAJE DE LA RESISTENCIA NORMAL EN CILINDROS (28 DÍAS)

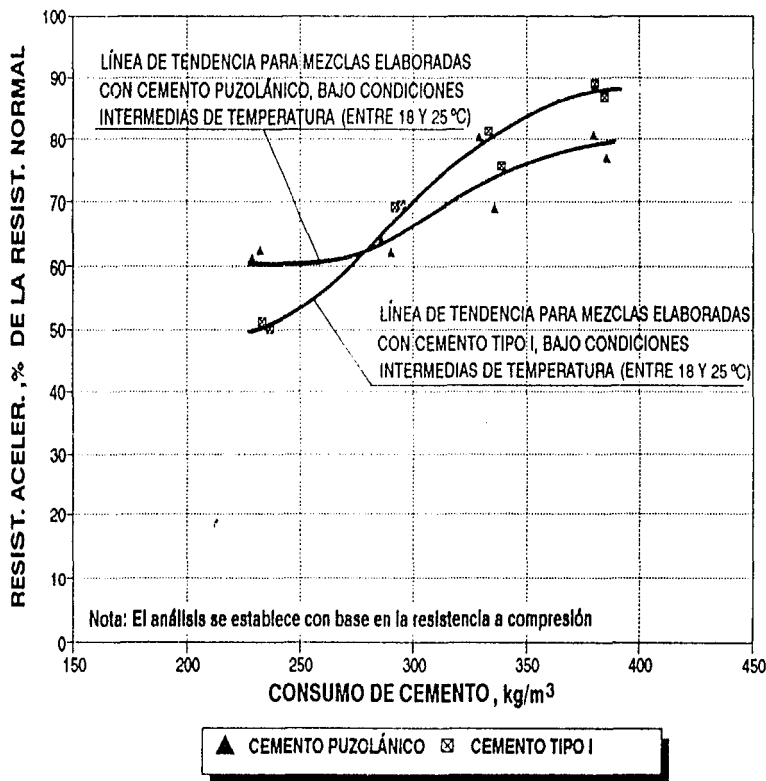


Fig 29

Variación del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba propuesto, en función del consumo de cemento.

RESISTENCIA ACELERADA EN CUBOS (24 HORAS) COMO PORCENTAJE DE LA RESISTENCIA NORMAL EN CILINDROS (28 DÍAS)

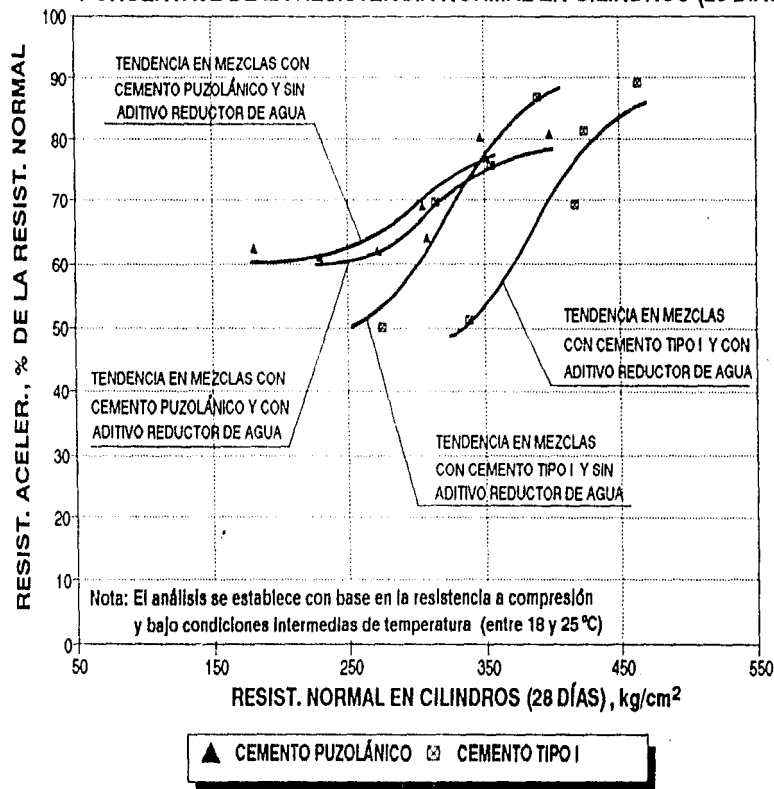


Fig 30

Variación del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba propuesto, en función del nivel de resistencia alcanzado.

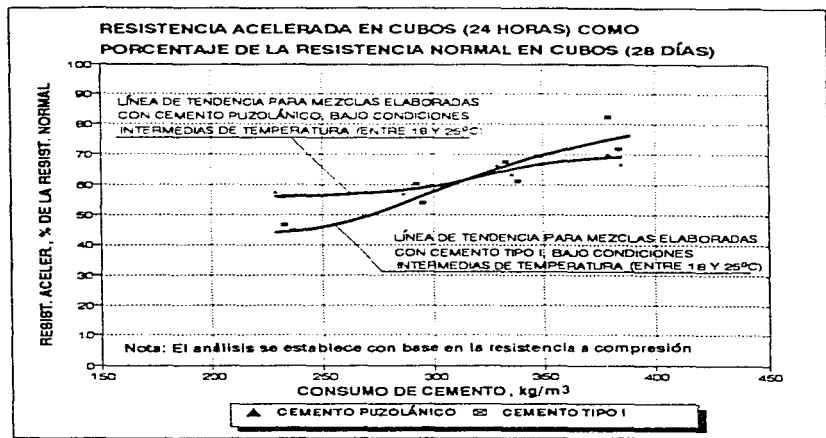


Fig 31

Variación del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba propuesto, en función del consumo de cemento.

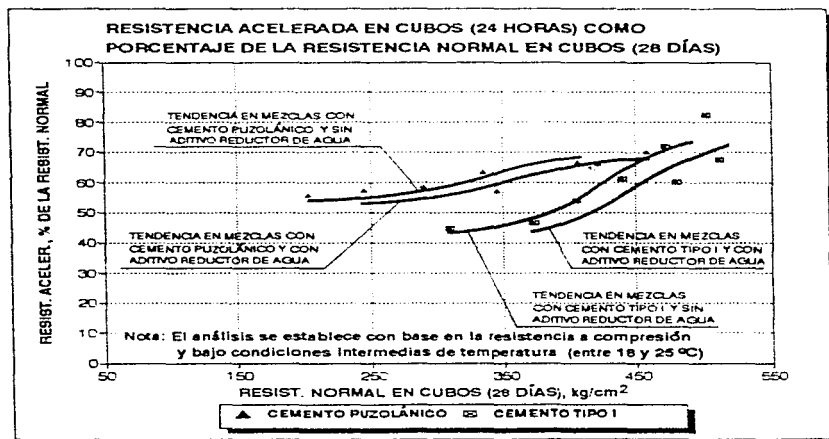


Fig 32

Variación del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente mediante la aplicación del método de prueba propuesto, en función del nivel de resistencia alcanzado.

MADUREZ DESARROLLADA POR EL CONCRETO EN ESPECÍMENES CÚBICOS DE PRUEBA, DE ACUERDO AL CONSUMO DE CEMENTO

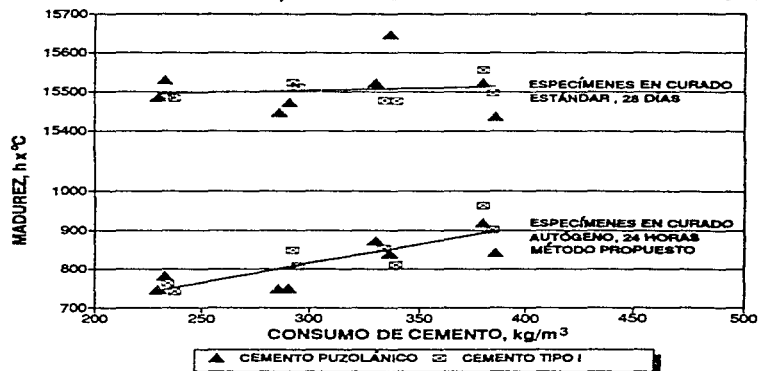


Fig 33

Grado de madurez desarrollado por especímenes cúbicos de concreto tanto a 24 horas curado autógeno (método propuesto) como a 28 días curado estándar; en función del consumo de cemento.

RELACIÓN ENTRE LA MADUREZ ADQUIRIDA ACELERADAMENTE (CUBOS 24 HRS MÉTODO PROPUESTO) Y SU CORRESPONDIENTE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

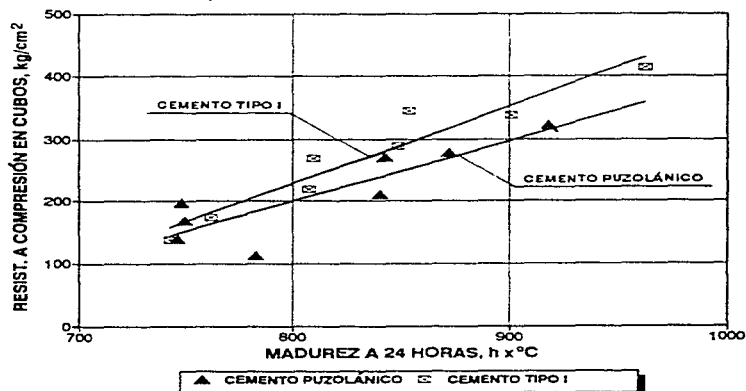
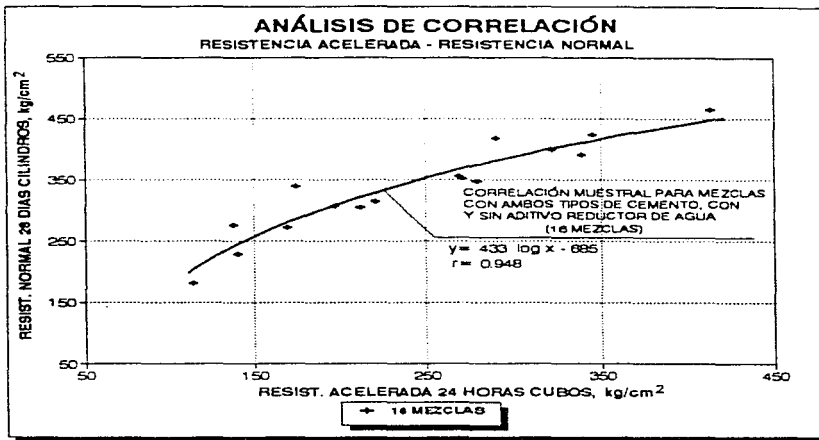
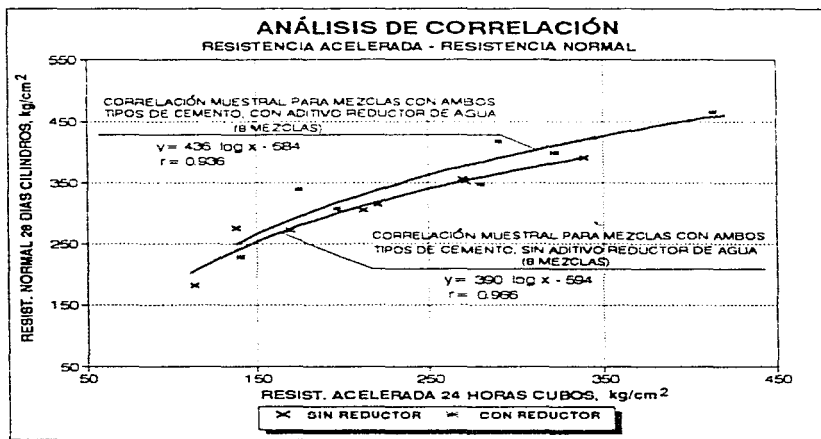


Fig 34

Relación entre los valores de madurez y de resistencia a compresión, obtenidos a 24 horas como resultado de la aplicación del método de prueba propuesto.



- a) Considerando mezclas con ambos tipos de cemento y sin distinción del uso de aditivo reductor de agua.

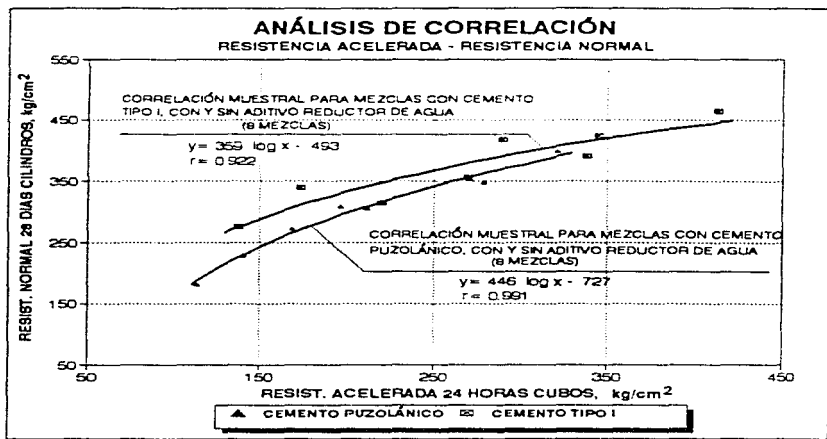


- b) Considerando mezclas con ambos tipos de cemento, pero diferenciando el uso de aditivo reductor de agua.

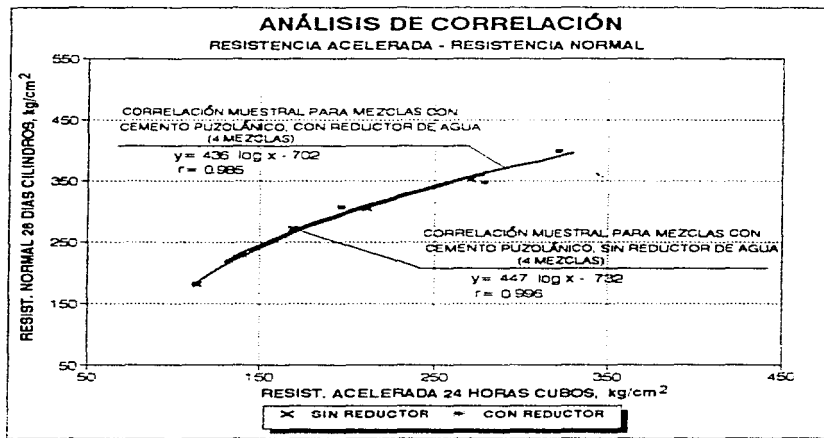
Fig 35

Análisis de regresión y de correlación efectuado con los valores de resistencia a compresión de las mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación.

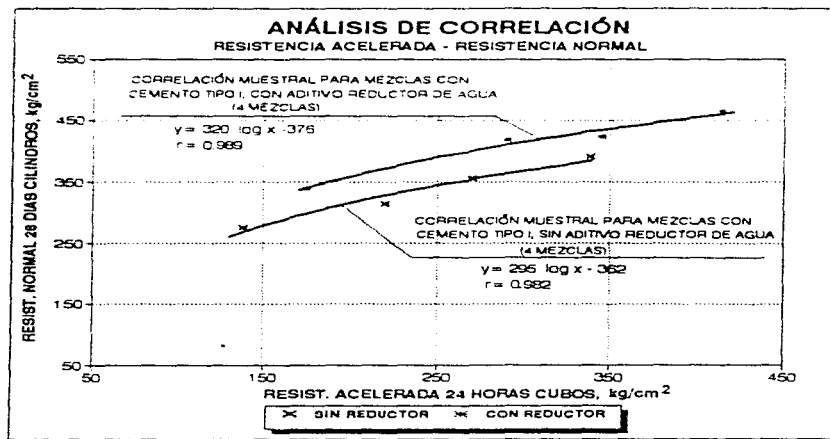
continúa...



- c) Considerando mezclas de un solo tipo de cemento, pero sin distinción del uso de aditivo reductor de agua.

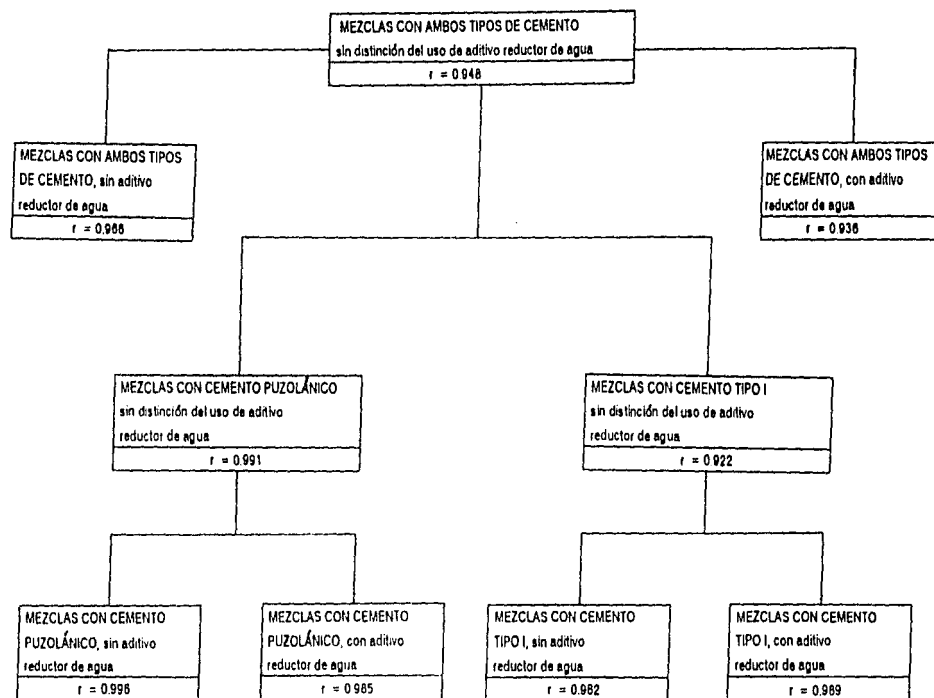


- d) Considerando mezclas de un solo tipo de cemento y diferenciando el uso de aditivo reductor de agua.



- e) Considerando mezclas de un solo tipo de cemento y diferenciando el uso de aditivo reductor de agua.

Fig 35 (continuación).



ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

donde:

Nota: El análisis de correlación se efectuó con las resistencias a compresión, en cubos (24 horas) y cilindros (28 días), para mezclas elaboradas bajo condiciones de temperatura entre 18 y 25°C

características de las muestras (mezclas)
con las cuales se efectuó la correlación
coeficiente de correlación, r

Fig 36

Análisis de correlación efectuado con los valores de resistencia a compresión (acelerada a 24 horas y normal a 28 días) de las mezclas elaboradas en la primera etapa de evaluación del método de prueba propuesto.

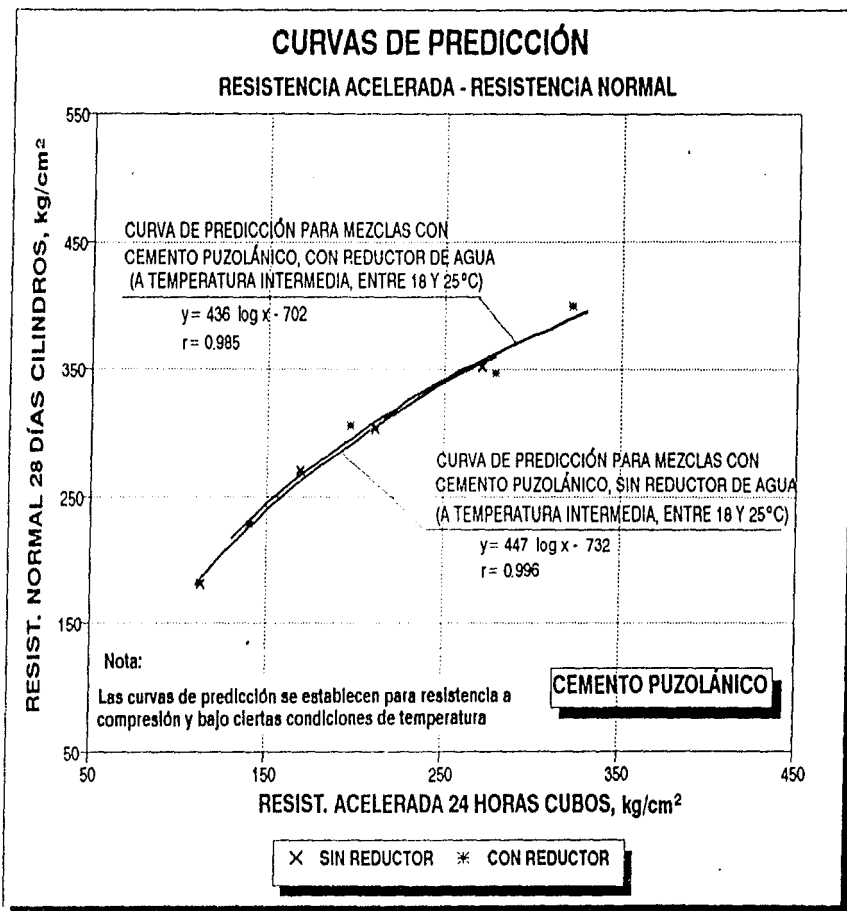


Fig 37

Curvas de predicción para mezclas elaboradas con cemento puzolánico y diferenciando el uso de aditivo reductor de agua.

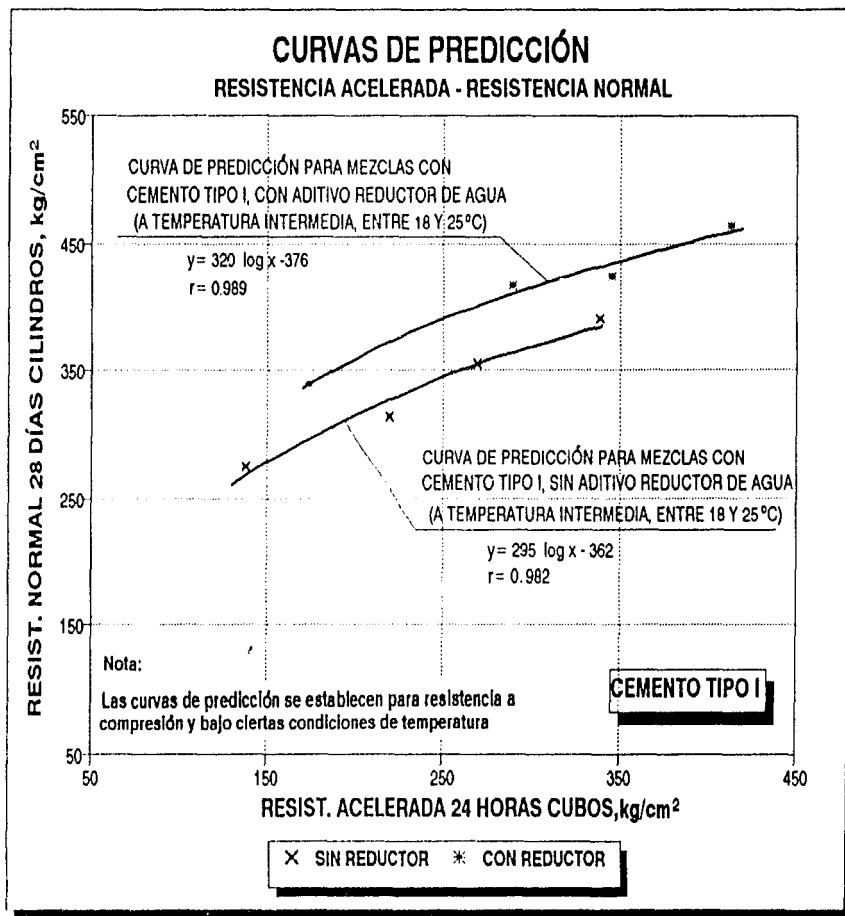


Fig 38

Curvas de predicción para mezclas con cemento tipo I y diferenciando el uso de aditivo reductor de agua.

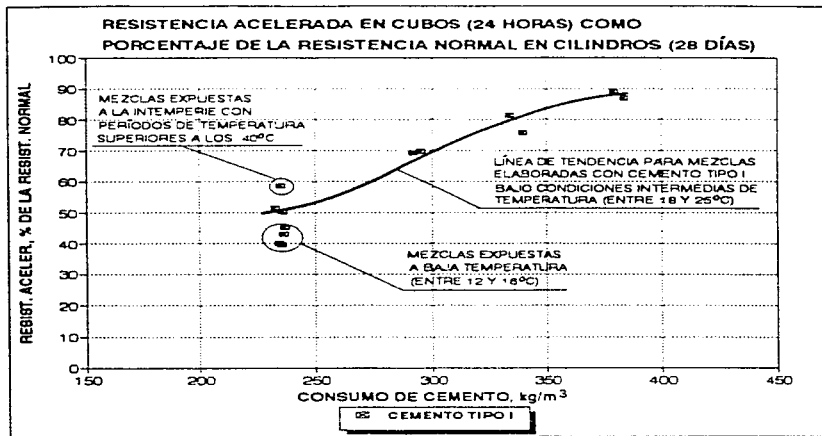


Fig 39 Análisis comparativo de la influencia de la temperatura en cuanto a la magnitud del porcentaje de resistencia normal obtenido aceleradamente.

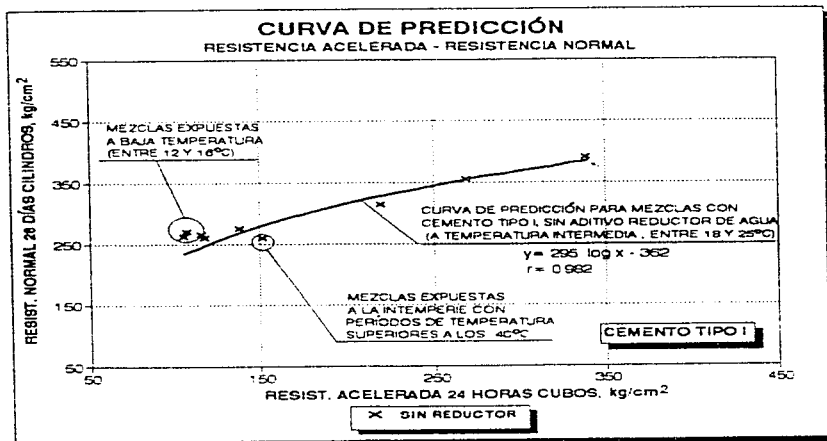


Fig 40 Variación en la estimación de la resistencia normal a partir de resistencias aceleradas obtenidas en condiciones de baja y alta temperaturas.

APÉNDICE A

INSTRUMENTACIÓN DE UNA PRUEBA ACELERADA PARA PRONOSTICAR LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

Lauro Santiago C. *

Rubén Romero M. **

Ulises Hernández D. ***

* Técnico Académico del Instituto de Ingeniería, UNAM.

** Becario de Tesis de maestría del Instituto de Ingeniería.

*** Tesista de Licenciatura de ingeniero Mecánico Electricista.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del proyecto "Instrumentación de una prueba acelerada para pronosticar la resistencia del concreto", por parte de la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, tiene como antecedente el proyecto *Método acelerado para verificar la resistencia mecánica del concreto* (No.5566). El objetivo de dicho proyecto es verificar y calibrar experimentalmente un método para pronosticar la resistencia del concreto a 28 días de edad mediante una prueba efectuada a las 24 horas, esta prueba utiliza un curado adiabático y un aditivo acelerante de la hidratación del cemento, como agentes aceleradores de la resistencia.

Del método que se propone se considera que sus resultados pueden ser muy sensibles a los cambios de cemento y al empleo de otros aditivos y a la variación de la temperatura. Por lo tanto, es justo suponer que se establezcan correlaciones de resistencia para concreto con diferentes componentes, elaborados en distintas condiciones de temperatura.

Considerando que el desprendimiento de calor por la hidratación del cemento incrementa su velocidad de liberación, por la adición del cloruro de calcio, y que si se impide la liberación de este calor y se acumula por medio de un aislante térmico, al cabo de 24 horas debe producirse un mayor aumento de temperatura en el concreto con cloruro de calcio, en relación con el que no lo contiene, y este incremento adicional de temperatura debe actuar como efecto secundario para obtener mayor resistencia acelerada.

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de diseñar y construir un sistema que permita evaluar 8 canales de temperatura, teniendo presentes las siguientes consideraciones:

- El equipo se diseñará alrededor de un microcontrolador.
- Se construirá para un rango de medición de temperaturas de 0° C a 100° C, con una precisión de 1° C.
- Incluirá fuente de alimentación a partir de la línea comercial.
- Registro de datos en memoria de estado sólido.
- Comunicación serial a una computadora (por lo que se desarrollarán programas de aplicación) e indicadores de inicio de operación y en operación.
- Tarjeta de conexiones. La longitud de conexión entre sensores y el sistema será de 4m.
- El muestreo de variables se hará cada 5 minutos.
- Todo el equipo se montará en un gabinete.

II. DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

III.1. INTRODUCCIÓN

Diversas propiedades de las sustancias (volumen, presión, resistencia eléctrica, coeficiente de expansión, etc.) varían de acuerdo con la temperatura del medio en el que se encuentran inmersas, de ahí que se aprovechen estas variaciones para medirla.

Existe una gran variedad de termómetros cuyas características dependen de la propiedad utilizada para realizar la medición. Algunos de los termómetros que podemos encontrar son:

- *Termómetro de gas ideal.* - Se basa en el comportamiento de un gas ideal a baja presión:

$$pV=mRT$$

Para el termómetro de gas se llena un volumen fijo con gas y se expone a la temperatura que se va a medir. La presión del sistema del gas se mide a la temperatura T ; a continuación, el volumen se expone a una referencia estándar de temperatura y la presión se mide en estas condiciones, a un volumen constante:

$$T = T_{ref} (p/p_{ref}) \quad \text{a volumen constante}$$

- *Medición de la temperatura por efectos mecánicos.* - Algunos dispositivos experimentan un cambio de dimensión mecánica ocasionado por un cambio de temperatura.

El termómetro de líquido en vidrio es uno de los tipos más comunes de dispositivos de medición de temperatura. Un bulbo relativamente grande en la parte más baja del termómetro contiene la mayor cantidad del líquido, el cual se expande cuando se calienta, y sube por el tubo capilar en el cual está grabada una escala apropiada. En la parte superior del tubo capilar se coloca otro bulbo, a fin de proporcionar seguridad en caso de que el margen de la temperatura del termómetro se exceda de manera inadvertida. Los líquidos más usados son el alcohol y el mercurio. El alcohol tiene la ventaja de poseer un coeficiente de expansión más alto que el mercurio; pero está limitado a mediciones de baja temperatura, debido a que tiende a hervir a temperaturas altas. El mercurio no puede usarse abajo de su punto de congelación de -37.8°C . El tamaño del capilar depende del tamaño del bulbo sensor, el líquido y los márgenes de temperatura deseados para el termómetro.

En operación, el bulbo del termómetro se expone al ambiente cuya temperatura se va a medir. La elevación de la temperatura causa que el líquido se expanda en el bulbo y suba por el capilar, indicando, por lo tanto, la temperatura del medio en una escala previamente graduada.

Por lo general los termómetros de mercurio en vidrio se aplican hasta 315° C; pero su alcance puede extenderse a 538° C llenando el espacio sobre el mercurio con un gas como el nitrógeno. Esto aumenta la presión en el mercurio, eleva su punto de ebullición y permite, por lo tanto, el uso del termómetro a temperaturas más altas.

- *Medición de la temperatura por efectos eléctricos.*- Los métodos eléctricos para la medición de temperatura son muy convenientes, debido a que proporcionan una señal que puede detectarse con facilidad y amplificarse o usarse para otros propósitos de control.

El termómetro de resistencia eléctrica es un método bastante exacto de medición de temperatura. Consiste en algún tipo de elemento resistor expuesto a la temperatura que se va a medir. La temperatura se indica mediante la medición en el cambio de resistencia del elemento. Pueden usarse varios tipos de material como elementos resistores:

El *Termistor* es un dispositivo semiconductor que tiene un coeficiente negativo de temperatura para la resistencia, en contraste con el coeficiente positivo de la mayor parte de los metales. Además, la resistencia sigue una variación exponencial con la temperatura, es decir:

$$R=R_o \exp(\beta((1/T)-(1/T_o)))$$

donde R_o es la resistencia a la temperatura de referencia T_o y β una constante experimentada. El valor numérico de β varía entre 3500 y 4600° K, dependiendo del material del transmisor y la temperatura.

El termistor es un dispositivo muy sensible y puede anticiparse un comportamiento consistente dentro de 0.1% con calibración apropiada. Una característica bastante atractiva del termistor es que puede usarse a fin de compensar la temperatura de los circuitos eléctricos. Esto es posible debido al coeficiente negativo de temperatura de modo que puede usarse para contrarrestar el aumento de resistencia de un circuito, conforme aumenta la temperatura.

- *Medición de la temperatura por efectos termoelectrónicos.*- El método eléctrico de medición de temperatura más común usa el termopar. Cuando se unen dos materiales distintos, se presenta una fem en los extremos, la cual es una función de la temperatura en la junta (efecto Seebeck).

- *Semiconductores.*- Se ha demostrado, utilizando la física de estado sólido, que la corriente en un diodo puede relacionarse matemáticamente con la temperatura (T_k) y la polarización aplicada (V) de la siguiente manera:

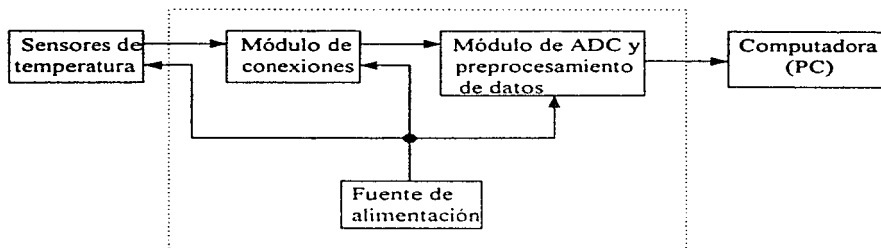
$$I=I_s(e^{Kv/T_k}-1)$$

donde I_s = corriente de saturación inversa
 $K= 11600/\eta$

con $\eta = 1$ para el germanio y 2 para el silicio, en caso de pequeños valores de I .
 $T_k = T_c + 273^\circ$ (T_k , grados Kelvin, T_c , grados Celsius).

Esta característica es aprovechada para desarrollar los sensores de temperatura, que al convivir con otros circuitos, permiten obtener los sensores de tipo comercial.

El sistema de medición de temperaturas debe cumplir con ciertas características, según se mencionó en la Introducción del presente informe, que al ser estudiadas y analizadas nos dan la pauta para realizar su diseño, el cual, a nivel de diagrama de bloques, presenta la siguiente estructura:



Adquisidor de datos

La fuente de alimentación, el módulo de conexiones y el sistema adquisidor, se localizan dentro de un gabinete, el cual tiene conectores para enlazar al sistema con la PC y hacia los sensores de temperatura.

Los voltajes necesarios para polarizar al sistema y a los sensores son proporcionados por la fuente de alimentación. Una vez polarizado el sistema se inicia la lectura de temperaturas que se registra en cada sensor y se almacena en memoria de estado sólido (RAM) repitiéndose lo anterior cada cinco minutos. Durante el tiempo previo a cada almacenamiento de datos, el sistema se ocupa de las peticiones (si las hay) que el usuario le envía a través de la PC, tales como iniciar muestreo, solicitar datos, ver contenido de memoria RAM, calibración de sensores y ver temperatura actual registrada por cada sensor.

El módulo de conexiones se emplea para acondicionar las señales proporcionadas por los sensores de temperatura, es decir, eliminar el ruido que se ha sumado a la señal original, y evitar, de esta manera, lecturas erróneas.

II.II. DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA

SENSORES DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura empleado para el sistema es de tipo semiconductor, el LM35DZ. Este sensor presenta las siguientes características:

- Calibración directa en grados Celcius.
- Factor de escala lineal (10mV/C).
- Rango de operación de 0-100 C.
- Rango de polarización de 4-33 volts.
- Bajo consumo de corriente.
- Bajo costo.

Los sensores de temperatura son polarizados con cinco volts por el sistema.

La distancia máxima que puede haber entre los sensores y el gabinete que guarda al sistema es de cinco metros (condición de diseño).

Se tiene la posibilidad de intercambiar los sensores, en el gabinete del sistema, debido a que su conexión se realiza por medio de conectores; su calibración, se realiza por medio de software y de manera independiente; únicamente se recomienda tener perfectamente identificado el canal asignado a cada sensor y realizar la calibración antes de iniciar el muestreo.

Para mayor información referente al sensor, ver las hojas de especificaciones del LM35DZ en el apéndice C de la referencia A-1.

MÓDULO DE CONEXIONES

La señal entregada por los sensores de temperatura traen consigo un cierto nivel de ruido (voltaje aleatorio que se suman a la señal original), ocasionado por la naturaleza misma del sensor, el medio en el que se encuentra inmerso, los componentes del sistema, etc. Las consecuencias de tener una señal con ruido se manifiestan en el momento de procesarlas, debido a que las lecturas dadas por el sensor se encuentran alteradas.

Una manera de eliminar el ruido presente en una señal es sometiéndola a un proceso de filtrado, que consiste en introducir la señal a un circuito que tiene la capacidad de eliminar las señales que se deseen (en este caso las señales de ruido) presentes en la señal original.

El filtro empleado en nuestro caso es un RC (resistencia-capacitor), cuya frecuencia de corte es de 885 Hz, es decir, un filtro paso-bajas, en el cual las señales que tengan una frecuencia

superior a la mencionada serán eliminadas, con lo cual, obtenemos resultados bastante satisfactorios, debido a que los sensores entregan una señal de corriente directa.

Una vez que se ha eliminado el ruido de nuestra señal original (la entregada por los sensores de temperatura) estamos en posibilidades de introducirla al microcontrolador para su procesamiento.

El diagrama eléctrico de este circuito se localiza en el apéndice A de la referencia A-1.

SISTEMA ADQUISIDOR

Es el módulo más importante debido a que lleva a cabo las funciones más relevantes de nuestro sistema, es decir:

- Realizar el muestreo de las variables (temperatura) con el periodo definido (cinco minutos).
- Efectúa la conversión de la señal analógica, entregada por los sensores de temperatura, a una señal de tipo digital, esto con la finalidad de que se pueda procesar y almacenar la información, tanto por el microcontrolador como por la PC.
- Almacenar en memoria de estado sólido (RAM) las temperaturas registradas por cada sensor bajo un formato predefinido.
- Atender las peticiones que el usuario hace via la PC.

Cada una de las señales enviadas por los sensores de temperatura son tomadas por el convertidor analógico/digital (ADC), después de haber pasado por un proceso de filtrado en el módulo de acondicionamiento. El ADC tiene una resolución de diez bits, esto indica que por cada lectura de temperatura que se realice, el ADC nos entrega un número de diez dígitos (en sistema binario), que es el equivalente a la temperatura del medio donde se encuentra inmerso el sensor correspondiente. Una vez obtenida la conversión, se procede a darle un formato predefinido con la intención de almacenarla con un orden específico y, al mismo tiempo, aprovechar al máximo la memoria de estado sólido (RAM).

El puerto serie del microcontrolador es aprovechado para establecer la comunicación con la PC, de esta manera se envían las lecturas almacenadas en la RAM (temperaturas) y se atienden las peticiones del usuario.

Las conexiones de los componentes empleados para realizar lo descrito hasta el momento se pueden observar en el diagrama eléctrico correspondiente (ver apéndice A de la referencia A-1).

FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Es el módulo encargado de proporcionar los niveles adecuados de voltaje para todos los componentes del sistema. La obtención de dichos voltajes se obtiene a partir de la línea comercial, previo a un proceso de conversión de la corriente alterna (entregada por la línea comercial) a corriente directa (como lo requieren los componentes del sistema).

Las características principales de este módulo son:

- Proporciona tres niveles de voltaje: +12, -12 y 5 volts.
- La demanda máxima de corriente puede ser de hasta un ampere (A), cabe aclarar que el sistema de medición de temperaturas demanda 0.15 A.

En cuanto a las protecciones que brinda la fuente de alimentación al sistema de medición de temperaturas, podemos mencionar las siguientes:

- Supresión de picos de voltaje ocasionados por las variaciones de voltaje en la línea comercial.
- Protección contra corto circuito.

El diagrama eléctrico correspondiente al circuito podemos observarlo en el apéndice A de la referencia A-1.

II.III. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

LENGUAJE DE MAQUINA

El desarrollo de este programa se realizó bajo el análisis de todas y cada una de las actividades que debe realizar el sistema de monitoreo, las cuales dan forma a la estructura final del programa (ver apéndice B de la referencia A-1). Las funciones que realiza el sistema se enlistan a continuación:

- Monitoreo de los ocho canales de temperatura con un intervalo de cinco minutos entre muestreos, para lo cual se diseñó una subrutina de manera que el microcontrolador estuviera decrementando registros que se cargan con valores previamente calculados (de acuerdo con los tiempos de ejecución de cada instrucción), también, dentro de esta subrutina, el microcontrolador realiza diversas tareas, de esta manera el tiempo total que lleva al microcontrolador realizar las actividades descritas anteriormente da un total de cinco minutos; es importante señalar que si la velocidad de transmisión es cambiada, habrá que recalcular el valor de los registros debido a la dependencia que existe entre retardo y velocidad de transmisión.

- Realización de la conversión de analógico a digital de la señal proveniente de los sensores de temperatura (LM35) por medio del ADC (de aproximaciones sucesivas) con que cuenta el microcontrolador.

- Almacenamiento de las conversiones en la memoria RAM. Lo importante en este punto fue optimizar la memoria RAM de modo que su aprovechamiento fuese máximo, esto es porque al almacenar el resultado de una conversión se ocupa un byte y dos bits (no olvidar que el convertidor es de diez bits) empleando por tanto dos bytes por conversión. Para aprovechar al máximo la memoria RAM se optó por almacenar en bytes subsecuentes los ocho bits más significativos de cada conversión, en grupos de cuatro canales, y agrupar la parte menos significativa (dos bits por cada conversión) de los cuatro canales, esto con la finalidad de formar un byte que contenga los dos bits menos significativos de los cuatro canales agrupados.

También se lleva un control que nos indica si la memoria se ha llenado más de una vez o únicamente de manera parcial, con la finalidad de que el usuario pueda tener conocimiento acerca de la cantidad de datos que hasta el momento el sistema ha recolectado y si le son suficientes para realizar su objetivo.

Una vez que el microcontrolador ha muestreado los ocho canales y los ha almacenado en memoria, entra a la subrutina de retardo de cinco minutos; es en esta parte del programa que se habilita al microcontrolador para atender las peticiones que por medio de la computadora (vía puerto serie) le son enviadas por el usuario, dichas peticiones pueden ser, por ejemplo, de iniciar el muestreo, calibración de sensores, solicitar los datos que hasta el momento se han almacenado en memoria, solicitar el contenido de toda la memoria RAM (sin importar el tiempo que lleve muestreando el microcontrolador), cada una de estas peticiones son atendidas, el la mayoría de los casos, por medio de subrutinas, que a continuación explicamos de manera general:

- a) Iniciar muestreo: Cuando el sistema se polariza, el microcontrolador inicia el proceso de muestreo automáticamente, aunque el usuario tiene en todo momento la facilidad de iniciar el muestreo en el instante que el así lo decida.

- b) Calibración de sensores: Es una subrutina que toma la temperatura del canal indicado por el usuario y la envía a la PC, con la finalidad de que se observe en pantalla y el usuario pueda hacer el ajuste correspondiente.

- c) Solicitar datos que hasta el momento se hayan almacenado en memoria RAM. Esta petición se ejecuta por medio de una subrutina, la cual toma en cuenta si la memoria RAM se ha llenado con datos por más de una ocasión o si nunca lo ha hecho, esto con la finalidad de manejar adecuadamente el apuntador de la memoria RAM (DPTR). En el caso de que la memoria nunca se haya llenado completamente, basta con guardar la última dirección que halla indicado el apuntador de la memoria en un registro auxiliar y enviar los datos desde la localidad cero hasta la indicada por el registro auxiliar. Si la memoria se ha llenado completamente (en este

caso los resultados más recientes de cada conversión reemplazan a los mas viejos) se hace necesario el empleo de dos registros auxiliares, cada uno indicando un extremo (el límite inferior indica el dato más viejo, en tanto que el límite superior indica el dato más reciente), de esta manera se envia primeramente, del limite inferior hasta la última localidad con que cuenta la memoria RAM y de la localidad cero hasta la indicada por el límite superior. Cuando esta instrucción ha sido ejecutada el sistema vuelve a condiciones iniciales.

d) Solicitar todo el contenido de la memoria RAM. Esta instrucción es muy parecida a la anterior, pero con la diferencia de que al ejecutarla y después de haber enviado todo el contenido de la memoria RAM (ocho mil bytes), el sistema continua con el muestreo que estaba realizando, es decir, esta instrucción no modifica ningún valor de registro después de su ejecución. Esta instrucción tiene la ventaja de permitir al usuario acceder cuantas veces desee al contenido de la memoria RAM y en el momento que así lo decida, teniendo la seguridad de que su muestreo continuará sin verse afectado.

Mientras se está ejecutando el retardo de los cinco minutos, la mayor parte de este tiempo se aprovecha para enviar el resultado de la conversión de los ocho canales a la computadora y atender las peticiones del usuario.

- La transmisión de datos de la memoria (cualquiera de la peticiones que la involucran) se lleva a cabo en bloques de 256 bytes para realizar un *checksum* y detectar posibles errores en la transmisión. De esta forma se envía a la computadora (en orden de transmisión): clave para enviar datos (encabezado), número de datos que contendrá el bloque, datos del bloque y resultado del *checksum*. La computadora a su vez envía un clave para indicar que los datos fueron correctos o bien solicitar su retransmisión.

El listado del programa correspondiente a esta sección se encuentra en el apéndice B de la referencia A-1.

LENGUAJE DE ALTO NIVEL

Es el programa desarrollado e instalado en la PC mediante el cual se transmiten las peticiones que usuario del sistema necesite realizar.

El desarrollo de este programa se llevó a cabo tomando como referencia las funciones que puede realizar el sistema de medición, y el manejo de la información enviada por el sistema hacia la PC (guardarla en archivo).

A continuación se describe cada uno de los comandos con que cuenta dicho programa; cabe aclarar que después de cada instrucción se encierra entre paréntesis las teclas que deben ser pulsadas, de manera simultánea, para su ejecución.

- Iniciar (Alt + I). Obliga al sistema de medición de temperaturas a iniciar el proceso de muestreo, siempre y cuando no haya un muestreo activo en el momento de ejecutar la instrucción. La hora de inicio de muestreo queda registrada y el usuario puede visualizarla (consultar instrucción "Ver").

- Solicitar (Atl + S). Las temperaturas almacenadas por el sistema de medición, hasta el momento de ejecutar esta instrucción, son tomadas por la PC y almacenadas en un archivo cuyo nombre se asigna de manera automática, empleando la fecha de solicitud ,un número y la extensión .DAT, es decir , siguiendo el formato: dd-mmm-aa-n.DAT.

Donde:

- dd representa el día (número).
- mmm representa las tres primeras letras del mes.
- aa representa las dos últimas cifras del año.
- n representa un número consecutivo (0-9) para diferenciar archivos con la misma fecha.

En el archivo se consigna su nombre, hora y fecha correspondiente al principio y fin de muestreo, así como también las temperaturas. Existen nueve columnas, las cuales en orden de izquierda a derecha, representan el intervalo -en minutos- entre muestreo, y la temperatura de cada canal en orden ascendente (desde el uno hasta el ocho).

Las lecturas almacenadas en este archivo pueden visualizarse desde cualquier editor de texto o alguna hoja de cálculo.

Esta instrucción sólo podrá emplearse si se tiene un muestreo activo, de otra manera se indicará un error.

- Lectura (Atl + L). Se emplea cuando queremos "observar" el contenido de toda la memoria de estado sólido (RAM) -lugar donde se almacenan las lecturas de temperatura- con la finalidad de obtener lecturas parciales dentro del muestreo. Esta instrucción no afecta el estado del muestreo en ejecución.

El archivo en el que se almacena la información tiene las mismas características que las descritas para la instrucción anterior, a excepción de la extensión del archivo, que para este caso será .LEC.

- Ver (Atl + V). Esta instrucción nos permite ver en pantalla la temperatura que está registrando cada uno de los sensores, la hora de inicio del muestreo y la hora actual. Se puede ejecutar dicha instrucción siempre y cuando haya muestreo activo. El estado de nuestro muestreo permanece inalterado.

- Calibrar (Alt + C). Cuando se ha hecho un cambio de sensores o éstos se van a emplear por vez primera dentro del sistema, conviene realizar una calibración para que las lecturas de temperatura entregadas por los sensores, coincidan con la temperatura del medio en el que se encuentran inmersos. En esta opción se tiene la facilidad de calibrar sensor por sensor, hasta que el usuario haga coincidir la temperatura del medio con la registrada por el sensor, para lo cual se le pide introducir la temperatura del medio ("temperatura real: _____") y se le entrega la registrada por el sensor a calibrar.

Esta instrucción se puede emplear únicamente antes de iniciar un muestreo, de otra forma queda inhabilitada.

- Terminar (Alt + T). Se sale del programa y regresa al sistema operativo.

Importante: Se debe tener en cuenta que por la capacidad de memoria de estado sólido (RAM) y el diseño mismo del software, el tiempo máximo de muestreo sin que las temperaturas registradas se reescriban -y por tanto se pierdan muestras- es de 68 horas, por tal motivo si el muestreo a realizar dura más de 68 horas, debemos tomar lecturas parciales o bien solicitar datos cada determinado tiempo.

III. CALIBRACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA

Cada uno de los módulos del sistema se probaron, primeramente, de manera individual, hasta obtener los parámetros esperados de cada uno de ellos y, posteriormente, se observó su comportamiento en conjunto hasta cubrir las expectativas. Una vez hecho la anterior se procedió a caracterizar a los sensores de temperatura como se señala a continuación:

Se requirió un especial interés para los sensores de temperatura, ya que de su comportamiento dependen muchas consideraciones de diseño, por tal motivo se procedió a comprobar las especificaciones que proporciona el fabricante, especialmente en lo que respecta a su precisión, en el rango de 0°C a 100°C.

De acuerdo con el fabricante (ver hojas de especificaciones), los sensores tienen una precisión de $\pm 0.9^\circ\text{C}$ al rededor de una temperatura de 25°C , las pruebas realizadas al los sensores empleadas dan los siguientes resultados:

- De 0°C a 57°C se tiene una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.
- De 58°C a 100°C se tiene una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Lo anterior nos llevó a realizar un ajuste por medio de software (programa) de tal manera que se incremente la temperatura registrada en un grado al sobrepasar los 57°C .

La caracterización de los sensores se llevó a cabo de la siguiente manera: utilizando los sensores a emplear, un termopar y un termómetro de mercurio, se introdujeron en un recipiente con agua hirviendo (para temperaturas "altas") y en agua a temperatura "baja" (7 °C), posteriormente se registraba la temperatura dada por los sensores, el termopar y termómetro de mercurio (al variar la temperatura del agua), a intervalos de un grado centígrado.

La calibración de los sensores se llevó a cabo al introducirlos en un recipiente térmico (termo), junto con un termómetro de mercurio, y tomar la temperatura indicada por este último, después de un cierto tiempo (con la finalidad de esperar a que la temperatura fuera homogénea) y hacer coincidir, mediante la opción de calibrar, la temperatura indicada por cada uno de los sensores.

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Actualmente el sistema (en su totalidad) se encuentra concluido, y todas y cada una de sus partes, tanto el hardware como software, se han probado satisfactoriamente a nivel laboratorio; no obstante se debe tener presente que este es un sistema que se está probando por vez primera en campo (por parte de los Institutos de Ingeniería, en su Coordinación de Estructuras, y de Física) quedando abierta la posibilidad de realizar mejoras y/o correcciones al sistema en caso de sugerirse o bien de necesitarse.

V. REFERENCIA

- A-1 Santiago, L., Romero, R., Hernández, U., "Instrumentación de una Prueba Acelerada para Pronosticar la Resistencia del Concreto", Informe interno del proyecto 5132 del Instituto de Ingeniería UNAM, D.F., México 1996.

APÉNDICE B

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/m³) 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 cueñan 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.