

# FABRICACIÓN, CURADO ACELERADO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO

INV E – 412 – 13

## 1 OBJETO

---

- 1.1** Este método de ensayo establece cuatro procedimientos para fabricar, curar y ensayar especímenes de concreto almacenados bajo condiciones que intentan acelerar el desarrollo de su resistencia. Los procedimientos son los siguientes:
- 1.1.1** Procedimiento A: Método de agua caliente.
  - 1.1.2** Procedimiento B: Método de agua hirviendo.
  - 1.1.3** Procedimiento C: Método de curado autógeno.
  - 1.1.4** Procedimiento D: Método de alta temperatura y presión.
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INV E-412-07.

## 2 RESUMEN DEL MÉTODO

---

- 2.1** Los especímenes de concreto son expuestos a condiciones de curado acelerado que les permiten desarrollar una porción significativa de su resistencia última en un lapso que varía entre 5 y 49 horas, dependiendo del procedimiento utilizado. Los procedimientos A y B someten a los especímenes a la acción de agua a alta temperatura para lograr un curado rápido sin pérdida de humedad. En el procedimiento A, el nivel de la temperatura del agua es moderado con el propósito de conservar el calor generado por la hidratación de los especímenes. En el procedimiento B, el nivel de temperatura empleado tiene como objeto proveer a las muestras un calentamiento acelerado. El procedimiento C involucra el almacenamiento de los especímenes en una cámara aislada en la cual la elevada temperatura de curado se obtiene del calor producido por la hidratación del cemento. Las cámaras aisladas también previenen la pérdida de humedad. El procedimiento D involucra la aplicación simultánea de elevadas temperaturas y presiones a los especímenes de concreto, en cámaras especiales. Los procedimientos de muestreo y ensayo son los mismos que se emplean con los especímenes curados normalmente (Ver normas INV E-401 e INV E-410, respectivamente).

- 2.2** Las características relevantes de estos procedimientos se presentan en la Tabla 412 - 1.

### **3 IMPORTANCIA Y USO**

---

- 3.1** Los procedimientos de curado acelerado entregan, en el menor tiempo posible, una indicación de la resistencia que puede alcanzar una mezcla de concreto. Estos procedimientos también proveen información sobre la variabilidad en el proceso de producción, la cual se puede utilizar en el control de calidad.
- 3.2** La resistencia temprana obtenida por alguno de los métodos descritos en este método, puede ser usada para estimar la resistencia del concreto que resulte del ensayo convencional de 28 días. Puesto que la práctica de usar valores de resistencia obtenidos de cilindros curados normalmente durante 28 días está muy difundida, los resultados de los ensayos acelerados de resistencia se usan a menudo para estimar la resistencia a mediano y largo plazo bajo condiciones normales de curado. Estas estimaciones se deben limitar a concretos elaborados con los mismos materiales y proporciones que los usados para establecer la correlación. El Anexo B presenta un procedimiento para estimar el intervalo de 90 % de confianza del promedio de resistencia a edad posterior, a partir de los resultados de los ensayos acelerados.
- 3.3** La correlación que se obtenga entre la resistencia obtenida por un procedimiento de curado acelerado y la lograda por un curado convencional, dependerá de los materiales utilizados en el concreto, de las proporciones utilizadas en la mezcla y del ensayo específico de ensayo acelerado.
- 3.4** El usuario debe escoger el procedimiento por utilizar sobre la base de su experiencia y de las condiciones para llevar a cabo el ensayo. Los procedimientos referenciados resultan útiles si se dispone de cámaras de curado y equipos para medir la resistencia a la compresión dentro de los tiempos especificados por los ensayos.

Tabla 412 - 1. Características de los procedimientos de curado acelerado

PROCEDIMIENTO	MOLDES	ORIGEN DE LA RESISTENCIA POR CURADO ACCELERADO	TEMPERATURA DEL CURADO ACCELERADO ° C (° F)	INICIO DEL TIEMPO DEL CURADO ACCELERADO	DURACIÓN DEL CURADO ACCELERADO	EDAD EN EL INSTANTE DEL ENSAYO
A. Agua caliente	Reutilizables o de un solo uso	Calor de hidratación	35 (95)	Inmediatamente después del moldeo	23.5h ± 30 min	24 h ± 15 min
B. Agua hirviendo	Reutilizables o de un solo uso	Agua hirviendo	Hirviendo	23 h ± 30 min después del moldeo	3.5 h ± 30 min	28.5h ± 15 min
C. Autógeno	Un solo uso	Calor de hidratación	Temperatura inicial del concreto aumentada por el calor de hidratación	Inmediatamente después del moldeo	48 h ± 15 min	49h ± 15 min
D. Temperatura y presión elevadas	Reutilizables	Calor y presión externos	150 (300)	Inmediatamente después del moldeo	5 h ± 5 min	5.25h ± 30 min (añadir 30 minutos si se usa refrentado con mortero de azufre)

## 4 INTERFERENCIAS

---

- 4.1** Cuando se requiera el tamizado húmedo del concreto antes del moldeo de los especímenes debido a las limitaciones del tamaño máximo (como en el caso del Procedimiento B, el cual está limitado al uso de agregados con tamaño máximo de 25 mm), se debe considerar el efecto de dicho tamizado sobre el contenido de aire y sobre la resistencia de los especímenes de ensayo.

## 5 EQUIPO

---

- 5.1** El equipo y las herramientas menores para fabricar especímenes, medir el asentamiento y determinar de contenido de aire, deben cumplir con lo indicado en las normas INV E-402, INV E-404 e INV E-406.

**5.2** *Moldes:*

- 5.2.1** Los moldes cilíndricos para el ensayo de especímenes usados en los procedimientos A, B y C, deben cumplir con la especificación ASTM C 470. Si los especímenes van a ser ensayados sin refrentado, se deben usar solamente moldes reutilizables con placas de cierre maquinadas que puedan ser aseguradas en ambos extremos del molde. Las placas de cierre deben producir especímenes con superficies de contacto planas con una tolerancia no mayor de 0.05 mm (0.002"), y cuyas bases no se desvíen de la perpendicularidad con respecto al eje del cilindro en más de 0.5° (equivalentes a 10 mm/m o 1/8" en 12"). Una vez ensamblado, el molde debe ser suficientemente rígido para que, una vez llenado con el concreto, pueda cambiar de la posición vertical de llenado a una posición horizontal de curado sin que se presente pérdida de mortero o daño en el espécimen de ensayo.

- 5.2.2** Los moldes cilíndricos para el procedimiento D deben presentar las siguientes características:

**5.2.2.1** Ser hechos de acero inoxidable.

**5.2.2.2** Estar equipados con tapas metálicas removibles en los extremos y empaques anulares de caucho.

**5.2.2.3** Estar equipados con un elemento de calentamiento capaz de elevar la temperatura del conjunto, concreto y molde, hasta

150 ± 3° C (300 ± 5° F) en un tiempo de 30 min ± 5 min y de mantener esa temperatura durante el tiempo requerido para la realización del ensayo.

**5.2.2.4** Estar equipados con elementos que midan la temperatura en el molde, para garantizar que la temperatura del concreto satisface los requerimientos del ensayo.

**5.2.2.5** Estar equipados con un elemento de carga compañero, capaz de mantener sobre el concreto una presión de 10.3 ± 0.2 MPa (1500 ± 25 lbf/pg<sup>2</sup>) durante el período de curado.

### **5.3** Aparatos de curado:

#### **5.3.1** Tanque de curado acelerado para los procedimientos A y B:

**5.3.1.1** Se puede utilizar un tanque de cualquier configuración, que resulte apropiado para contener el número de cilindros que se van a ensayar. La disposición de los cilindros debe ser tal, que provea una separación de al menos 50 mm (2") entre el lado de cada cilindro y la pared del tanque y de 100 mm (4") entre cilindros adyacentes, como mínimo. El nivel del agua en el tanque se debe mantener, al menos, 100 mm (4") por encima de las caras superiores de los cilindros.

*Nota 1: Es conveniente que el tanque contenga una tubería de rebose para controlar el nivel del agua. Se han usado muchos tipos de tanques con éxito. En el Anexo A se presentan algunas guías al respecto.*

**5.3.1.2** El tanque debe estar equipado con elementos de control térmico que sean capaces de: (1) proveer la temperatura especificada en el agua, (2) mantener la temperatura del agua dentro de ± 3° C (± 5° F) respecto del valor especificado, en cualquier punto del agua, y (3) limitar la caída de la temperatura del agua, después de la inmersión de los especímenes, a menos de 3° C (5° F), y retornarla al valor especificado en un tiempo de 15 minutos. Además del termostato, se requieren termómetros u otros instrumentos de medición de la temperatura, para verificar la temperatura del agua.

*Nota 2: Dependiendo de las características del tanque, podría ser necesario un aislamiento y/o agitación mecánica, para satisfacer el requerimiento especificado de temperatura. Se considera como una forma apropiada de calentamiento, el uso*

*de calentadores eléctricos de inmersión controlados por un termostato. El tamaño de los elementos de calentamiento requeridos dependerá del tamaño del tanque y del número de especímenes que van a ser curados simultáneamente.*

**5.3.1.3** La placa de apoyo de los especímenes debe ser perforada, con el fin de permitir la circulación del agua.

**5.3.1.4** Para el procedimiento B, se requiere que el tanque tenga una tapa ajustada para reducir la evaporación. Este requisito es opcional en el procedimiento A.

**5.3.2** *Recipiente de curado para el procedimiento C:*

**5.3.2.1** El recipiente consiste en un aislante térmico que mantiene el calor y rodea de cerca los especímenes de concreto.

**5.3.2.2** El recipiente debe tener la posibilidad de ser abierto para permitir la inserción o retiro de los especímenes. Además, debe contener una cubierta externa y un revestimiento interno para proteger el aislante térmico de daños mecánicos.

**5.3.2.3** El recipiente debe tener un termómetro que registre máximos y mínimos, el cual no debe estar aislado de los especímenes de concreto (Ver nota 10).

**5.3.2.4** El recipiente debe tener una tapa u otros medios para brindar un cierre seguro durante el tiempo de curado especificado. La tapa debe incluir un sello térmico que debe satisfacer los requerimientos del numeral 10.2.2.

**5.3.2.5** El recipiente debe tener la capacidad de albergar uno o dos especímenes de concreto.

*Nota 3: En el Anexo A se muestran algunos ejemplos de recipientes apropiados. Cualquier configuración es aceptable, siempre que satisfaga los requerimientos del numeral 10.2.*

**5.3.3** *Aparato de curado para el procedimiento D:*

**5.3.3.1** El aparato de curado consiste en un sistema de carga que aplica la presión especificada a los especímenes de concreto y a los moldes especiales para mantener los especímenes a una temperatura determinada durante el período de curado. El aparato de curado puede tener cualquier configuración que

sea adecuada para el número de especímenes de concreto que se van a ensayar. En el Anexo A se describe un aparato adecuado para el curado de tres especímenes.

#### 5.4 *Aparato para el refrentado de los cilindros:*

- 5.4.1 Si los especímenes requieren refrentado, se debe usar el equipo especificado en las normas INV E-403 o INV E-408.

## 6 MATERIALES

---

- 6.1 Compuesto para el refrentado o tapas no adheridas, para usar cuando las bases de los cilindros resulten inapropiadas para la ejecución del ensayo sin refrentar.

## 7 RIESGOS

---

- 7.1 Se deben aplicar todas las precauciones normales de laboratorio y campo al realizar las operaciones de muestreo, moldeo, curado y ensayo del concreto.
- 7.2 Se deben tomar medidas adicionales de seguridad cuando se use el procedimiento B, con el fin de prevenir escaldados u otras quemaduras como resultado del uso de agua hirviendo como medio de curado.
- 7.3 También, se deben tomar medidas adicionales de seguridad cuando se use el procedimiento D, con el fin de prevenir lesiones debido a las elevadas temperaturas y presiones usadas para el curado.

## 8 MUESTREO

---

- 8.1 Se determina el número de ensayos requeridos para un lote de concreto o un proceso de producción. Se usa un plan aleatorio o sistemático que provea el número de ensayos necesarios para caracterizar la resistencia del concreto usado en la construcción.
- 8.2 Si el lote o la producción son estratificados por sub-lotes, las muestras se localizan usando un procedimiento aleatorio estratificado. Si las circunstancias

recomiendan un enfoque no estratificado, se deberá usar un procedimiento aleatorio.

*Nota 4: Un procedimiento de muestreo aleatorio estratificado se puede implementar dividiendo cada lote de concreto en un número de sub-lotes de igual tamaño y seleccionando al azar una muestra de cada sub-lote. El número de sub-lotes debe ser igual al número de muestras que se programaron para ser tomadas del lote. Por ejemplo, si los requerimientos de la obra determinan que cada 500 m<sup>3</sup> de concreto se deben tratar como un lote y que se deben tomar cinco muestras de cada lote para determinar la resistencia a la compresión, se divide el lote en cinco sub-lotes iguales de 100 m<sup>3</sup> cada uno. Luego, se obtiene al azar una muestra de cada sub-lote. Los resultados de los ensayos de las cinco muestras obtenidas de esta manera proveen estimativos no sesgados de la resistencia a la compresión del lote de 500 m<sup>3</sup>. Este es el enfoque más práctico para asegurar que las muestras obtenidas incluyen el rango entero del concreto en el proceso de producción. Si se presentan sub-lotes de tamaño desigual debido al proceso constructivo, la ponderación de los resultados de los ensayos puede ser un medio apropiado para mantener la imparcialidad y la justificación del procedimiento de muestreo.*

*Nota 5: La norma INV E-730 contiene una tabla de números aleatorios y las instrucciones para su uso.*

## 9 PREPARACIÓN DE LOS APARATOS

---

- 9.1** *Métodos A y B* – Se activan los elementos de control térmico al menos una hora antes de comenzar los ensayos programados, para permitir la estabilización de la temperatura del agua y del equipo.
- 9.2** *Método C* – Se deben realizar los ensayos especificados en la Sección 10 antes de dar comienzo a los ensayos programados.
- 9.3** *Método D* – Se limpian y se verifican los moldes y las tapas de cierre antes de comenzar un ensayo. Se normaliza el sistema de carga en concordancia con lo indicado en la Sección 10 antes de dar comienzo a los ensayos programados.

## 10 NORMALIZACIÓN

---

- 10.1** Para todos los métodos, se deben verificar en forma periódica la calibración de la medida de la temperatura, el control y los componentes de registro.
- 10.2** *Requerimientos del Método C:*

**10.2.1** *Retención de calor* – Se coloca dentro del recipiente de curado autógeno un recipiente cilíndrico hermético con dimensiones internas de 300 mm (12") de altura por 150 mm (6") de diámetro. Se llena el recipiente con agua a una temperatura de 82° C (180° F), hasta una altura dentro los 6 mm (¼") del borde. Se inserta una termocupla en el



agua y se mide la temperatura inicial de ésta con un dispositivo de lectura confiable. A continuación, se sella el recipiente con una cubierta o bolsa plástica y se cierra el recipiente autógeno de curado. Cuando éste es almacenado en un ambiente de aire en calma a  $21 \pm 1^\circ \text{C}$  ( $70 \pm 2^\circ \text{F}$ ), los requerimientos de temperatura del agua son los siguientes:

TIEMPO TRANSCURRIDO, HORAS	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{F}$
12	$67 \pm 3$	$152 \pm 5$
24	$58 \pm 3$	$136 \pm 6$
48	$45 \pm 4$	$114 \pm 7$
72	$38 \pm 4$	$100 \pm 8$

**10.2.2** *Ensayo de impermeabilidad del sello aislante de calor* – Cuando el recipiente de curado autógeno se sumerge en agua a una profundidad de 150 mm (6") por encima de la junta entre las partes separables, no deberá haber escape de aire a través del sello aislante en un período de 5 minutos.

**10.2.3** *Estabilidad del recipiente* – El recipiente, o cualquier parte de él, no podrá presentar fisuras, fracturas o distorsiones cuando se mantiene a una temperatura ambiente de  $-30^\circ \text{C}$  ( $-20^\circ \text{F}$ ) por 72 horas, ni ablandamientos o distorsiones cuando se mantiene a una temperatura ambiente de  $60^\circ \text{C}$  ( $140^\circ \text{F}$ ) por 72 horas. El sello aislante de calor debe recobrar totalmente su espesor original inmediatamente después de un 50 % de compresión bajo las condiciones de temperatura recién indicadas.

### 10.3 *Requerimientos del Método D:*

**10.3.1** Se debe verificar periódicamente la calibración del componente de carga. Si éste se emplea también para someter los especímenes al ensayo de compresión, se deben seguir los requerimientos de la norma INV E-410.

## 11 ACONDICIONAMIENTO

**11.1** Los períodos de curado relativamente cortos usados en este método requieren que se preste una particular atención al acondicionamiento de los equipos y

de los especímenes de ensayo. Se deben cumplir fielmente los requerimientos sobre temperatura y tiempo de cada método.

## 12 PROCEDIMIENTO

---

### 12.1 Procedimiento A – Método del agua caliente:

**12.1.1 Preparación de los especímenes de ensayo** – Los especímenes se moldean tal como se establece en las normas INV E-402 o INV E-420, la que resulte aplicable.

#### 12.1.2 Curado:

**12.1.2.1** Si es necesario, se cubre la parte superior de los especímenes con una placa rígida, para prevenir la pérdida del mortero hacia el baño de agua.

**12.1.2.2** Inmediatamente después del moldeo, los especímenes de concreto se colocan en el tanque de curado (nota 6). Se mantiene el agua a una temperatura de  $35 \pm 3^\circ \text{C}$  ( $95 \pm 5^\circ \text{F}$ ) durante el instante de la inmersión y durante todo el período de curado.

*Nota 6: Si los especímenes son fundidos en moldes que cumplen los requerimientos del numeral 5.2.1, se podrán almacenar horizontalmente; de lo contrario, se deberán almacenar verticalmente en el tanque de curado.*

**12.1.2.3** Se registra la temperatura del agua de forma continua o periódica durante todo el tiempo de curado.

**12.1.2.4** Después de un tiempo de curado de  $23.5 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ , se retiran los especímenes del tanque y se remueven los moldes.

#### 12.1.3 Refrentado y ensayo:

**12.1.3.1** Se refrentan las bases de los especímenes que no sean planas o que se aparten de la perpendicularidad en relación con el eje central en más de  $0.5^\circ$  (aproximadamente el equivalente a  $10 \text{ mm/m}$  o  $1/8''$  en  $12''$ ), como se indica en las normas INV E-403 o INV E-408 (nota 7).

*Nota 7: Se permite el esmerilado de cilindros para garantizar superficies planas, siempre y cuando los especímenes se ensayen dentro de los límites especificados.*

**12.1.3.2** Para capas de refrentado adheridas, se debe usar un material de refrentado que al ser ensayado de acuerdo con la norma INV E-403 desarrolle, en un tiempo de 30 min, una resistencia igual o mayor que la resistencia de los especímenes que se van a ensayar.

**12.1.3.3** Si se usan capas de refrentado adheridas, los especímenes no se deberán ensayar antes de los 30 min siguientes al refrentado.

**12.1.3.4** Los especímenes se ensayan en un tiempo de 24 h  $\pm$  15 min, según lo establece la norma de ensayo INV E-410.

## **12.2** Procedimiento B – Método del agua hirviendo:

**12.2.1** *Preparación de los especímenes de ensayo* – Los especímenes se deben preparar de acuerdo con lo indicado en el numeral 12.1.1.

**12.2.2** *Curado inicial* – Los especímenes se deben cubrir para prevenir la pérdida de humedad y se almacenan para que no presenten alteraciones. Se mantiene el área de almacenamiento a una temperatura de 21  $\pm$  6° C (70  $\pm$  10° F). Se deben atender los requerimientos de la norma INV E-420 en relación con la protección y el almacenamiento de los especímenes de ensayo.

*Nota 8: Es necesaria una estricta atención en la protección y almacenamiento de los especímenes durante este periodo inicial para obtener resultados significativos, debido al reducido periodo de curado total.*

### **12.2.3** *Curado acelerado:*

**12.2.3.1** A las 23 h  $\pm$  15 min después del moldeo, se colocan los moldes cubiertos en el tanque de agua (nota 9). Se mantiene en ebullición la temperatura del agua tanto en el instante de la inmersión como durante todo el período de curado (nota 10).

*Nota 9: Precaución* – Además de otras precauciones, el operador debe usar vestimenta apropiada y protección para los ojos, cara, manos y brazos, para prevenir lesiones por repentinas fugas de vapor cuando se abre el recipiente o se sumergen los cilindros en el agua hirviendo. Se sugiere el uso de tenazas para descender lentamente los moldes en el agua sin producir salpicaduras.

*Nota 10: En lugares confinados, la temperatura del agua se puede mantener por debajo del punto de ebullición para evitar una evaporación excesiva. La temperatura a la cual el agua hierve varía según la elevación sobre el nivel del mar. Diferencias en las resistencias, causadas por diferencias en las temperaturas, no se consideran significativas, pero la comparación de resultados entre las áreas así afectadas, debe ser soportada por correlaciones apropiadas e interpretadas con el conocimiento de las variaciones de temperatura.*

**12.2.3.2** Se debe registrar la temperatura del agua de forma continua o periódica durante el tiempo de curado.

**12.2.3.3** Después de un curado de  $3.5 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ , se retiran los especímenes del agua hirviendo, se remueven los moldes y se dejan enfriar los especímenes a temperatura ambiente, al menos durante una hora, antes de someterlos a refrentado.

**12.2.4 Refrentado y ensayo** – Los especímenes se deben refrentar y se ensayar en concordancia con lo indicado en el numeral 12.1.3, excepto que la edad en el instante del ensayo debe ser de  $28.5 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ .

### **12.3 Procedimiento C – Método autógeno:**

**12.3.1 Preparación de los especímenes de ensayo** – Los especímenes se deben preparar de acuerdo con lo indicado en el numeral 12.1.1.

*Nota 11: Los moldes metálicos reutilizables con placas y mordazas en sus extremos, pueden resultar inaceptables para este procedimiento.*

#### **12.3.2 Curado:**

**12.3.2.1** Inmediatamente después del moldeado, el molde se cubre con una placa metálica o una tapa ajustada y se coloca en una bolsa plástica de trabajo pesado, de la cual se debe expeler tanto aire atrapado como sea posible antes de su cierre. Alternativamente, se puede usar una caja plástica impermeable. La bolsa plástica debe ser suficientemente fuerte para resistir pinchazos y servir como elemento de sujeción para colocar y remover el espécimen del recipiente autógeno.

**12.3.2.2** Se ajusta el termómetro de máximas y mínimas y, una vez insertado el espécimen en el recipiente, se asegura la tapa de éste.

**12.3.2.3** Se registran el tiempo de moldeado con una precisión de 15 min, y la temperatura de las mezclas frescas de concreto en el molde sobre la parte exterior del recipiente de curado.

**12.3.2.4** Se almacena el recipiente de curado durante 12 horas, como mínimo, en un sitio que no esté sometido a perturbaciones o a la luz del sol y, preferiblemente, a una temperatura de  $21 \pm 6^\circ \text{C}$  ( $70 \pm 10^\circ \text{F}$ ).

**12.3.2.5** A las  $48 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$  después de moldeado el espécimen, se retira del recipiente de curado y se remueve el molde. Se deja el espécimen en reposo por 30 min a temperatura ambiente.

**12.3.2.6** Se registran la temperatura máxima y la temperatura mínima en el recipiente.

*Nota 12: La comparación de las temperaturas máxima y mínima registradas por el termómetro en el concreto fresco, proporcionará una indicación de un curado anormal o interrumpido, lo cual puede dar lugar a resultados de resistencias altas o bajas.*

**12.3.3 Refrentado y ensayo** – Los especímenes se deben refrentar y ensayar en concordancia con lo indicado en el numeral 12.1.3, excepto que la edad en el instante del ensayo debe ser de  $49 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ .

*Nota 13: El refrentado y el ensayo se pueden realizar en un tiempo diferente del especificado en el numeral 12.3.3. Algunas entidades que usan este procedimiento han establecido, por conveniencia, relaciones entre los resultados obtenidos a las 24, 72 y 96 h y los obtenidos luego de un curado húmedo convencional. Sin embargo, a las 24 h la relación es menos satisfactoria que las obtenidas mediante curado autógeno acelerado por 48, 72, o 96 h. Cuando el período de curado es diferente al especificado en el numeral 12.3.3, la edad a la cual se realiza el ensayo debe ser la del período de curado más una hora. La tolerancia de  $\pm 15 \text{ min}$  es aplicable.*

**12.4 Procedimiento D – Método de alta temperatura y presión:**

**12.4.1 Preparación de los especímenes de ensayo:**

**12.4.1.1** Para los aparatos de curado descritos en el Anexo A, los moldes son cilindros de  $75 \times 150 \text{ mm}$  ( $3 \times 6''$ ). Se sellan los moldes con sus tapones de base antes de ser llenados con el concreto.

**12.4.1.2** El procedimiento D está limitado a concretos que contengan un agregado de tamaño máximo de 25 mm (1"). Si contiene

partículas de mayor tamaño, se deberá realizar un tamizado húmedo de acuerdo con la norma INV E-401.

**12.4.1.3** Se vierte el concreto en los moldes en dos capas iguales y se golpea cada capa 10 veces con una varilla. Se enrasa la superficie superior del concreto con una herramienta especial (ver Figura 412A - 3) para lograr una superficie con la nivelación requerida para recibir el tapón metálico superior que transmite al concreto en el molde la presión designada de  $10.3 \pm 0.2$  MPa ( $1500 \pm 25$  lbf/pg<sup>2</sup>).

**12.4.2 Curado:**

**12.4.2.1** Inmediatamente después del moldeo, se cubre cada molde con un tapón de metal para sellar el concreto dentro del molde durante el proceso de curado.

**12.4.2.2** Se apilan los moldes verticalmente y se colocan en el aparato de carga descrito en la Sección 5.3.3.1. Se aplica y mantiene una presión de  $10.3 \pm 0.2$  MPa ( $1500 \pm 25$  lbf/pg<sup>2</sup>) sobre el concreto en los moldes.

**12.4.2.3** Se activa el elemento calentador especificado en el numeral 5.2.2.3, para elevar la temperatura del espécimen a  $150 \pm 3^\circ$  C ( $300 \pm 5^\circ$  F) en un tiempo de  $30 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ . El período de curado comienza cuando se activa el calentador.

**12.4.2.4** El período de curado dura  $5 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ . Durante las primeras tres horas se mantiene la temperatura del espécimen en  $150 \pm 3^\circ$  C ( $300 \pm 5^\circ$  F). Después de las tres horas se apaga el elemento calefactor y se mantiene la presión en  $10.3 \pm 0.2$  MPa ( $1500 \pm 25$  lbf/pg<sup>2</sup>) durante el tiempo restante de curado.

**12.4.2.5** Al finalizar el período de curado se libera la presión, se remueven los moldes del aparato de carga y se extraen los especímenes de los moldes.

*Nota 14: **Precaución:** El uso de altas temperaturas y presiones impone la necesidad de medidas de seguridad para prevenir escozor o quemaduras en los ojos, como resultado de escapes súbitos de vapor al remover los tapones de los moldes. Adicionalmente, se requieren otras precauciones como protección de ojos, cara y manos mientras se remueven los especímenes de los moldes. Se sugiere remover los tapones en una dirección opuesta a la del operador.*

*Nota 15: Se pueden usar revestimientos plásticos de polipropileno dentro de los moldes, para facilitar la extracción del concreto curado de los moldes.*

#### **12.4.3 Refrentado y ensayo:**

**12.4.3.1** Normalmente, los especímenes no necesitan ser refrentados para el ensayo, por cuanto los tapones metálicos producen superficies planas de contacto. Si las superficies de las bases no cumplen con los requerimientos establecidos en el numeral 12.1.3.1, los especímenes se deben refrentar en concordancia con lo indicado en el numeral 12.1.3.

**12.4.3.2** Se ensayan los especímenes a la compresión de acuerdo con la norma INV E-410, dentro de los 15 min posteriores a su remoción de los moldes. Si se requiere refrentarlos, se ensayarán 30 min después del refrentado.

*Nota 16: El aparato de carga usado para el periodo de curado también puede ser diseñado como una máquina de ensayo de compresión. (Ver Anexo A).*

### **13 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

---

**13.1** Los requerimientos sobre resistencia en códigos y especificaciones existentes no se basan en los resultados de curados acelerados; por lo tanto, se debe tener gran precaución al aplicar los resultados de este método en la predicción de las resistencias futuras. Como se establece en la Sección 15, la variación de resultados por este método es similar a la obtenida por los métodos tradicionales. Por lo tanto, los resultados se pueden usar en una evaluación rápida de la variabilidad del proceso de control y para señalar la necesidad de hacer ajustes en el mismo. Por otra parte, la magnitud de los valores de resistencia obtenidos es afectada por la combinación específica de materiales, de manera que el uso de los resultados, ya sea de ensayos convencionales a cualquier edad o de este método, debe ser soportado por la experiencia o por correlaciones desarrolladas por los laboratorios para las condiciones y materiales locales.

**13.2** Cuando este ensayo se usa como un medio para estimar la resistencia de un espécimen curado por un método tradicional a una edad específica, se deben emplear métodos estadísticos que tengan en cuenta las incertidumbres asociadas con la elaboración de estos estimativos. El Anexo B provee un método aceptable para este propósito. Antes de usar este método para determinar resistencias futuras bajo condiciones de curado normal, todas las

partes interesadas deberán estar de acuerdo sobre el método estadístico que se usará y sobre la manera como se van a interpretar los resultados. Si el método es empleado con fines de aceptación, en los documentos del proyecto se deberá dejar la constancia del criterio de aceptación.

*Nota 17: Un criterio recomendado para la aceptación del concreto sobre la base de un ensayo acelerado de resistencia, consiste en que el límite inferior del intervalo de confianza del 90 % de la resistencia promedio estimada de la muestra ensayada debe cumplir el criterio de aceptación de los cilindros curados en húmedo de forma convencional.*

## 14 INFORME

---

**14.1** Se debe reportar la siguiente información para cada espécimen ensayado:

**14.1.1** Número de identificación.

**14.1.2** Diámetro y longitud, mm (pg.).

**14.1.3** Sección transversal, mm<sup>2</sup> (pg<sup>2</sup>).

**14.1.4** Carga máxima, N (lbf).

**14.1.5** Resistencia a la compresión, calculada con redondeo a 0.10 MPa (10 lbf/pg<sup>2</sup>).

**14.1.6** Tipo de fractura.

**14.1.7** Defectos en el espécimen y en el refrentado.

**14.1.8** Edad del espécimen.

**14.1.9** Procedimiento usado para el curado acelerado .

**14.1.10** Temperaturas máxima y mínima, con aproximación a 1° C (1° F) si se utiliza el procedimiento C.

**14.1.11** Si es aplicable, el método de transporte usado para el envío del espécimen al laboratorio.

**14.1.12** Temperatura ambiente del espécimen durante el curado inicial en el procedimiento B, o del recipiente durante el almacenamiento en el procedimiento C.



## 15 PRECISIÓN Y SESGO

---

- 15.1** *Precisión* – La información usada para preparar las siguientes declaraciones de precisión fue obtenida usando medidas del sistema inglés.
- 15.2** Se determinó que el coeficiente de variación de un solo laboratorio para especímenes fabricados de una misma amasada es de 3.6 % para cilindros de dimensiones 150 × 300 mm (6 × 12") en los procedimientos A, B y C y de 6.7 % para cilindros de dimensiones 75 × 150 mm (3 × 6"), en el procedimiento D. En consecuencia, para cilindros de 150 × 300 mm (6 × 12") ensayados en correspondencia con los Procedimientos A, B y C, los resultados de dos ensayos de resistencia conducidos individualmente, en un mismo laboratorio y elaborados de una misma amasada, no deben diferir en más del 10.1 % de su promedio. Para cilindros de 75 × 150 mm (3 × 6") ensayados con el procedimiento D, la diferencia máxima aceptable entre tres pruebas individuales es 22.1 %.
- 15.3** Se determinó que el coeficiente de variación de un solo laboratorio para los resultados de ensayos entre amasadas fabricadas en días diferentes es de 8.7 % para cilindros de dimensiones 150 × 300 mm (6 × 12") usados en los procedimientos A, B y C, y de 20 % para cilindros de 75 × 150 mm (3 × 6"), usados en el procedimiento D. El resultado de un ensayo es el promedio de las resistencias de dos especímenes para los procedimientos A, B y C. Si se usa el procedimiento D, el resultado es el promedio de las resistencias de tres especímenes. En consecuencia, los resultados de resistencia de dos ensayos apropiadamente conducidos a partir de diferentes amasadas con los mismos materiales y fabricadas en días diferentes, no deben diferir en más de 24.4 % de su valor promedio para cilindros de 150 × 300 mm (6 × 12"), ni en más de 56 % para cilindros de 75 × 150 mm (3 × 6").

## 16 NORMAS DE REFERENCIA

---

ASTM C 684–99 (2003) (retirada 2012)

## ANEXO A (Informativo)

### APARATOS DE CURADO

#### A.1 Tanque de curado acelerado (Procedimientos A y B).

**A.1.1** Se han empleado satisfactoriamente tanques de curado similares a los mostrados en la Figura 412A - 1.

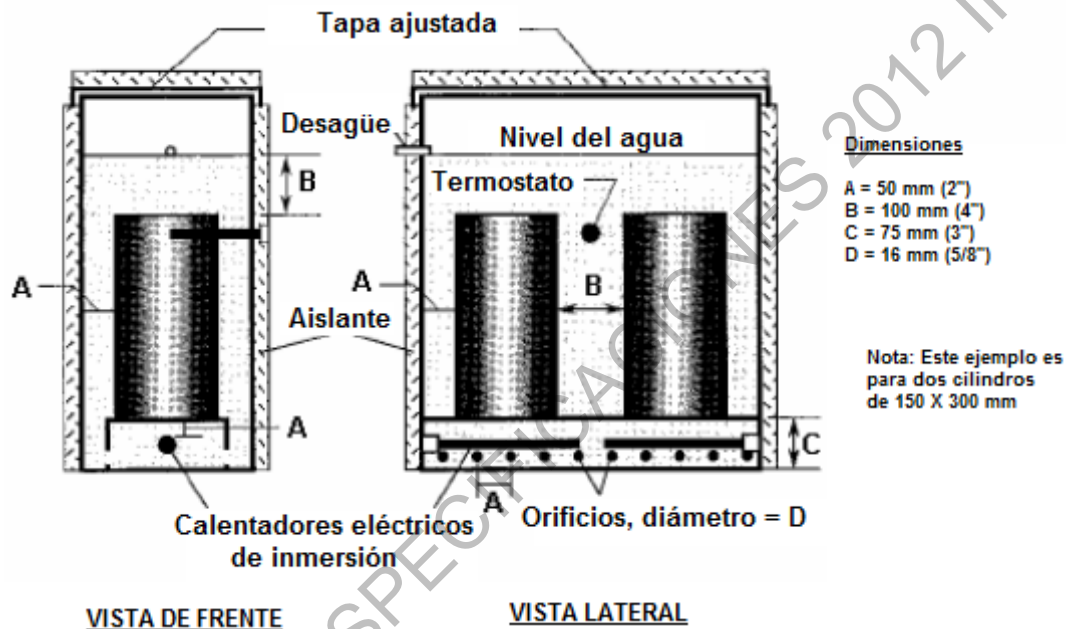


Figura 412A - 1. Diseño sugerido para un tanque de curado acelerado (Procedimientos A o B)

**A.1.2** Un diseño adecuado de tanques asegurará una propagación casi totalmente uniforme de la temperatura en ellos, sin necesidad de agitación mecánica. Los calentadores de inmersión se localizan en la parte central y tan cerca del fondo del tanque como sea posible. El agua por encima del calentador se debe mantener en circulación mediante corrientes de convección.

**A.1.3** Para un tanque que contenga dos o tres especímenes, se ha determinado que dos elementos acoplados (1500 y 5000 W) son satisfactorios para su uso en el procedimiento B. Mientras el elemento de menor tamaño mantiene la temperatura especificada de curado, el más grande funciona como un elevador para restablecer la ebullición en el tiempo especificado una vez que los especímenes han sido

sumergidos. Si el tanque se emplea solamente para el procedimiento A, los calentadores ya mencionados son también adecuados, pero es suficiente un solo calentador de 3000 W, con el cual el tanque puede ser de mayores dimensiones para albergar más de dos o tres especímenes cuando se usa para el Procedimiento A.

**A.1.4** El rebosadero situado cerca de la tapa y el aislante exterior no son esenciales en los tanques de curado que se emplean únicamente para el Procedimiento A.

**A.2** *Recipiente autógeno de curado (Procedimiento C).*

**A.2.1** Se han usado satisfactoriamente recipientes similares a los mostrados en la Figura 412A - 2.

**A.2.2** En la figura no se muestra el espacio para el termómetro de máxima y mínima, ni los elementos para la apertura del recipiente, para asegurarlo cuando está cerrado y para levantarlo.

**A.2.3** Se requiere un sello térmico en la cara de unión situada entre las partes separables del recipiente. El sello puede ser de los tipos laberinto o empaque, que cumpla los requerimientos descritos en los numerales 10.2.1, 10.2.2, y 10.2.3. Un empaque apropiado puede ser espuma de poliuretano ( $32 \text{ kg/m}^3$  o  $2 \text{ lb/pie}^3$ ) mantenida al 50 % de compresión cuando se cierra.

**A.2.4** Se ha determinado que la espuma de poliuretano de celda cerrada, con una densidad entre  $32$  y  $48 \text{ kg/m}^3$  y un coeficiente de conductividad térmica igual o menor a  $0.02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ( $0.15 \text{ BTU}\cdot\text{pg/h}\cdot\text{pie}^3\cdot\text{F}$ ), es un material aislante adecuado con los espesores especificados para satisfacer la retención de calor, según se indica en el numeral 10.2.1.

**A.2.5** El termómetro de máxima y mínima debe cubrir un rango entre  $-10$  y  $+65^\circ \text{ C}$  ( $20$  a  $150^\circ \text{ F}$ ) con incrementos de  $1^\circ$ .

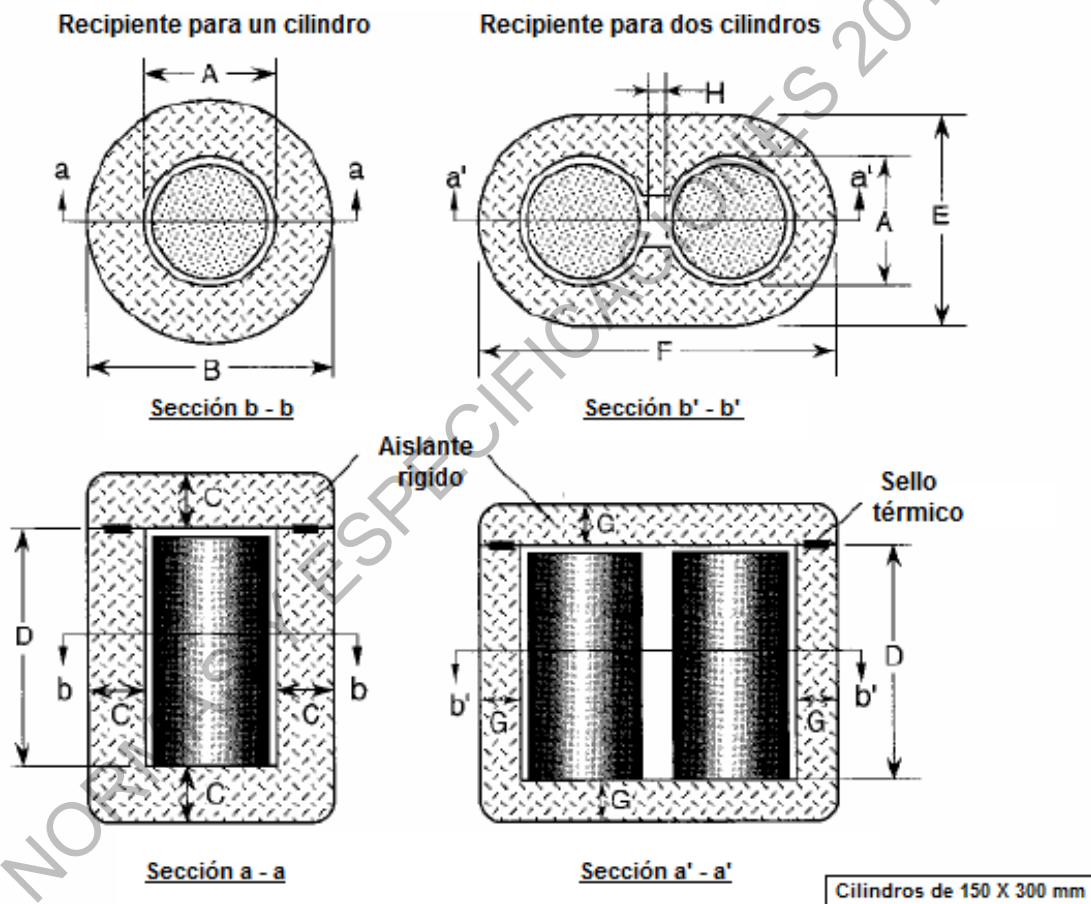
**A.3** *Equipo de alta presión y temperatura (Procedimiento D).*

**A.3.1** En la Figura 412A - 3 se muestra un equipo para la realización del Procedimiento D.

**A.3.2** Moldes apropiadamente diseñados asegurarán una distribución casi uniforme de la temperatura a través del concreto. Las resistencias

están menos espaciadas cerca de los bordes del molde, y más espaciadas en la parte central.

**A.3.3** Para un molde cilíndrico de 75 × 150 mm (3 × 6"), un calentador de 100 W elevará y mantendrá la temperatura especificada durante el período de curado. El aislamiento de fibra de vidrio R20 es suficiente para el elemento calefactor sugerido y el ciclo de curado requerido. Cada molde tiene su propio circuito eléctrico, de modo que si uno deja de funcionar, permanecerán dos moldes para curar satisfactoriamente dos especímenes. El sistema eléctrico debe tener indicadores de corriente, un temporizador y una alarma para lograr un proceso de curado automático y de sencilla verificación.

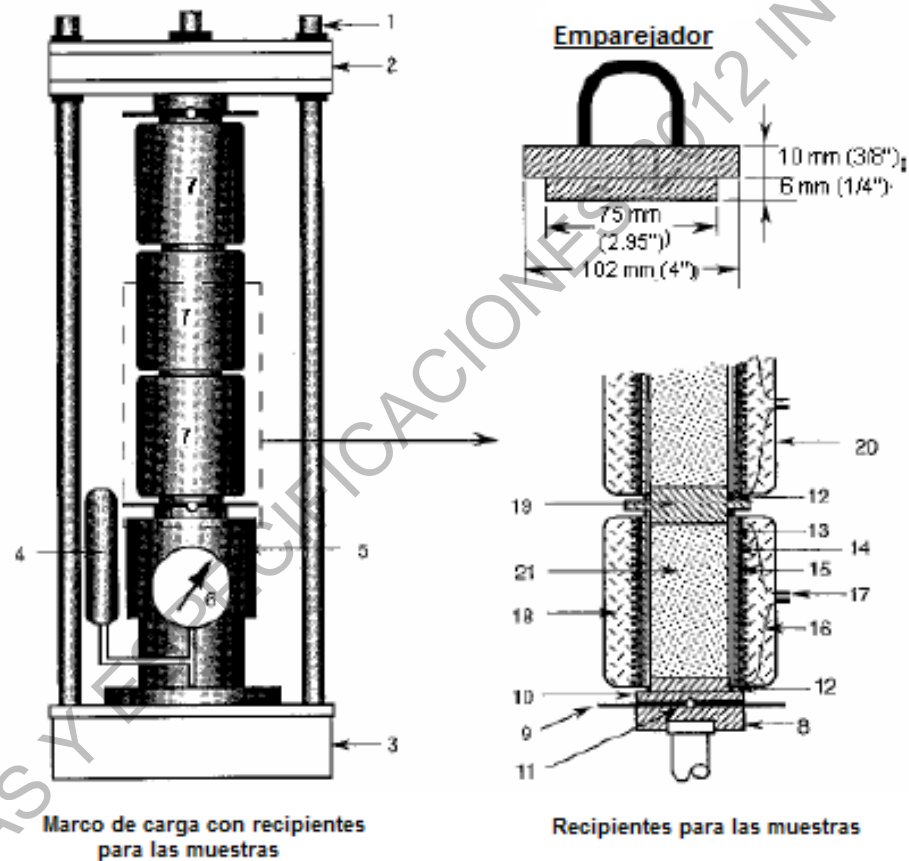


#### Dimensiones

A = 162 a 165 mm ( 6-3/8 a 6-1/2")	E = 290 a 293 mm (11-3/8 a 11-1/2")
B = 314 a 317 mm (12-3/8 a 12-1/2")	F = 464 a 483 mm (18-1/4 a 19")
C = 76 mm (3")	G = 64 mm (2-1/2")
D = 311 mm (12-1/4")	H = 13 a 25 mm (1/2 a 1")

Figura 412A - 2. Recipiente de curado autógeno para uno o dos cilindros (Procedimiento C)

- A.3.4** El gato hidráulico y el acumulador deben estar equipados con un medidor de presión que indique la presión que se está aplicando al concreto en los moldes. El acumulador debe estar calibrado de manera que mantenga la presión requerida de  $10.3 \pm 0.2$  MPa ( $1500 \pm 25$  lbf/pg<sup>2</sup>).
- A.3.5** Es deseable usar el aparato para ensayar los especímenes; en tal caso, deberá estar diseñado para funcionar como una máquina para ensayos de compresión, como se describe en la norma INV E-410.



#### Nomenclatura

- |                           |                                 |                                  |
|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. Barras de conexión     | 8. Cabezal del disco de soporte | 15. Aislante de alambre          |
| 2. Cabezal del equipo     | 9. Pantalla térmica             | 16. Alambre de calefacción       |
| 3. Base                   | 10. Cubierta y émbolo           | 17. Conector eléctrico           |
| 4. Acumulador             | 11. Esfera de carga             | 18. Aislante de fibra de vidrio  |
| 5. Gato hidráulico        | 12. Anillo-O                    | 19. Émbolo                       |
| 6. Medidor de presión     | 13. Revestimiento plástico      | 20. Revestimiento del contenedor |
| 7. Contenedor de muestras | 14. Molde cilíndrico            | 21. Especímen de concreto        |

Figura 412A - 3. Esquema del aparato de curado de alta presión y temperatura (Procedimiento D)

## ANEXO B (Informativo)

### ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA FUTURA A LA COMPRESIÓN

#### B.1 Ecuación de regresión.

**B.1.1** Para estimar la probable resistencia futura a la compresión de especímenes de concreto a partir de los resultados de ensayos acelerados, el laboratorio debe conducir suficientes ensayos, con el propósito de encontrar la relación entre los dos tipos de resistencia. Esto requiere, generalmente, la preparación de una serie de seis a diez mezclas, con relaciones de agua/cemento variando en el rango máximo verosímil que se pueda encontrar durante la construcción. Dichas mezclas deben incluir materiales similares a los que serán utilizados en la obra. Para obtener la ecuación de la recta que relaciona las resistencias obtenidas por métodos convencionales de curado con las obtenidas a partir de ensayos de curado acelerado, es suficiente un análisis de regresión de mínimos cuadrados. Esta relación es aplicable sólo para los materiales específicos y el procedimiento de ensayo acelerado utilizado. Se deben establecer franjas de confianza a la línea de regresión establecida, con el fin de tener en cuenta la incertidumbre de la recta resultante. Así, para un nuevo ensayo de resistencia acelerada, se puede estimar el intervalo de confianza de la resistencia futura. El procedimiento descrito en los numerales siguientes y el ejemplo ilustrativo se basan en trabajos de Wills<sup>1</sup> y Carino<sup>2</sup>.

**B.1.2** Se asume que la relación entre las resistencias obtenidas por métodos de curado convencional, las cuales se denominarán como Y, y las halladas por métodos de curado acelerado, que se denominarán como X, es una línea recta que se representa por la siguiente ecuación:

$$Y = a + b X \quad [412.1]$$

**B.1.2.1** Sin embargo, para algunas clases de mezclas, la relación entre ambas resistencias no es lineal recta. En estos casos, los

<sup>1</sup> Wills M. H., "Early assessment of concrete quality by accelerating compressive strength development with heat ( Results of ASTM Cooperative Test Program)", Journal of Testing and Evaluation, Vol 3, No. 4, July 1975, pp 251 – 262 .

<sup>2</sup> Carino N. J., "Prediction of potential strength at later ages", ASTM STP 169 C, Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials, Paul Klieger and Joseph F. Lamond eds., 1994, pp 140 – 152 .

valores de las resistencias calculadas deben ser transformados tomando los respectivos logaritmos naturales. Los logaritmos naturales de las resistencias se deben usar para obtener los valores promedios de X y Y los cuales, a su vez, serán usados en cálculos posteriores. La última etapa de este procedimiento consiste en aplicar la exponenciación para convertir los intervalos de confianza calculados en valores de resistencia.

- B.1.3** Se asume que “n” pares de valores ( $X_i$ ,  $Y_i$ ) han sido obtenidos de ensayos de laboratorio, donde  $X_i$  y  $Y_i$  son, respectivamente, las resistencias promedios de los especímenes sometidos a curado acelerado y a curado convencional. Los valores de la ordenada al origen “a”, y de la pendiente “b”, de la línea recta, se determinan usando el análisis corriente de mínimos cuadrados:

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad [412.2]$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad [412.3]$$

Donde:

$$S_{xy} = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad [412.4]$$

$$S_{xx} = \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad [412.5]$$

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{n} \quad [412.6]$$

$$\bar{Y} = \sum \frac{Y_i}{n} \quad [412.7]$$

- B.1.3.1** La desviación estándar residual de la recta de mejor ajuste,  $s_e$ , se obtiene con la siguiente expresión:

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left[ S_{yy} - \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}} \right]} \quad [412.8]$$

Donde:

$$S_{yy} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad [412.9]$$

**B.1.4** Para ilustrar el procedimiento, considérense las doce parejas de resistencias mostradas en las dos primeras columnas de la Tabla 412B - 1. Cada valor de resistencia es el promedio de las obtenidas en dos cilindros. Utilizando las ecuaciones antes descritas, se obtienen los siguientes valores:

$$\bar{X} = 16.30 \text{ MPa}$$

$$\bar{Y} = 38.90 \text{ MPa}$$

$$S_{xx} = 105.32 \text{ (MPa)}^2$$

$$S_{yy} = 164.14 \text{ (MPa)}^2$$

$$S_{xy} = 125.22 \text{ (MPa)}^2$$

**B.1.4.1** La pendiente de la recta,  $b$ , y su ordenada al origen,  $a$ , se obtienen, respectivamente, como sigue:

$$b = 125.22/105.32 = 1.19$$

$$a = 38.90 - 1.19 \times 16.30 = 19.50 \text{ MPa}$$

**B.1.4.2** En consecuencia, la ecuación que relaciona las resistencias obtenidas de un curado acelerado ( $X$ ) con las de un curado convencional ( $Y$ ), está dada por:

$$Y = 19.50 + 1.19 X \text{ (MPa)}$$

**B.1.4.3** La Figura 412B - 1 muestra los doce pares datos y la línea recta de mejor ajuste. La desviación estándar residual de la recta,  $s_e$ , se obtiene como sigue:

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{12 - 2} \left[ 164.14 - \frac{(125.22)^2}{105.32} \right]} = 1.23 \text{ MPa}$$



Tabla 412B - 1. Valores usados en un problema tipo para ilustrar el cálculo del intervalo de confianza para resistencias a los 28 días de curado

RESISTENCIA ACCELERADA, $X_i$ , MPa	RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS, $Y_i$ , MPa	RESISTENCIA ESTIMADA, $Y$ , MPa	$W_i$ , MPa	LÍMITE INFERIOR DE CONFIANZA, MPa	LÍMITE SUPERIOR DE CONFIANZA, MPa
12.06	33.71	33.85	1.50	32.35	35.35
12.15	34.33	33.96	1.48	32.48	35.44
12.96	35.23	34.92	1.30	33.62	36.22
13.85	35.05	35.98	1.12	34.86	37.10
15.19	37.74	37.58	0.92	36.66	38.50
16.09	37.21	38.65	0.86	37.79	39.51
17.08	40.71	38.92	0.89	38.93	40.71
18.15	40.97	41.10	1.02	40.08	42.12
18.24	41.96	41.20	1.03	40.17	42.23
18.42	41.60	41.42	1.06	40.36	42.48
20.12	45.73	43.44	1.41	42.03	44.85
21.28	42.50	44.82	1.69	43.13	46.51
<b>Intervalo de confianza para estimar la resistencia a partir de una resistencia acelerada de 17.00 MPa</b>					
17.00		39.73	0.89	38.84	40.62
16.40		39.01	0.86	38.15	
17.60		40.44	0.94		41.38

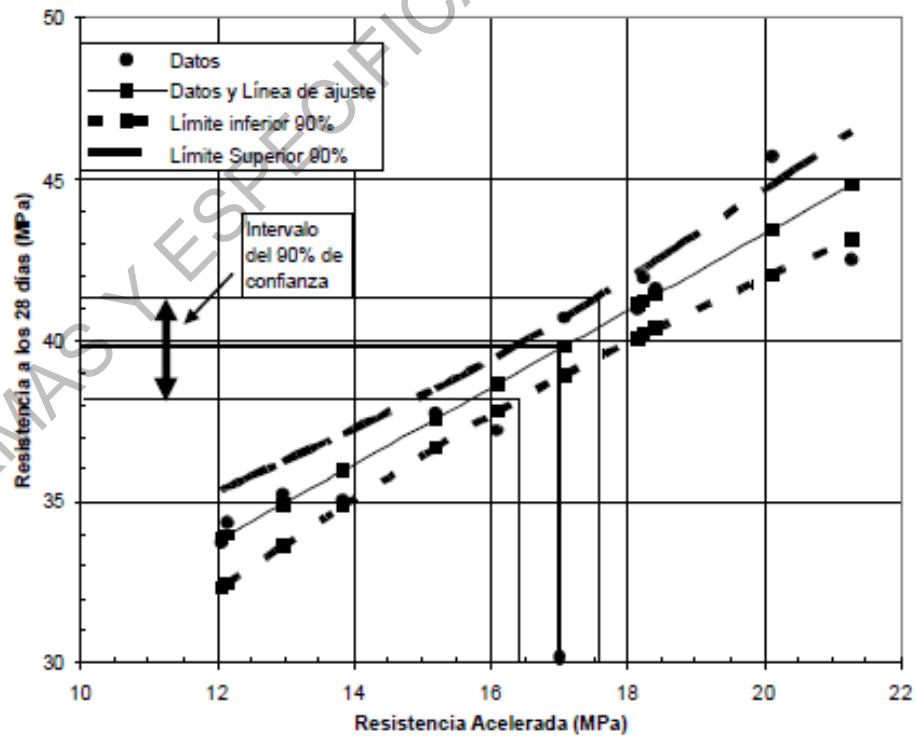


Figura 412B - 1. Franja de confianza para estimar la resistencia a los 28 días a partir de la medida de la resistencia acelerada, e intervalo del 90 % de confianza para una resistencia acelerada de 17 MPa

**B.2 Franja de confianza para la recta de regresión.**

**B.2.1** Debido a las incertidumbres en la estimación de la pendiente y de la ordenada al origen de la recta, hay incertidumbre cuando la recta se usa para estimar la resistencia promedio bajo curado convencional, a partir de la resistencia medida bajo curado acelerado. Esta incertidumbre se puede expresar construyendo la franja del 90 % de confianza para la recta de regresión. Esta franja se obtiene calculando  $Y_i$  para valores seleccionados de  $X_i$ , usando la ecuación de la línea recta y graficando  $Y_i \pm W_i$  contra  $X_i$ . El término  $W_i$  es la mitad del ancho de la franja de confianza de  $X_i$ , el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$W_i = s_e \sqrt{2F \left[ \frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{S_{xx}} \right]} \quad [412.10]$$

- Donde:  $s_e$ : Desviación estándar residual para la línea de mejor ajuste (ecuación 412.8);
- F: Valor de la distribución-F para 2 y  $(n - 2)$  grados de libertad y nivel de significación de 0.10;
- n: Número de puntos usados para establecer la línea de regresión;
- $X_i$ : Valor seleccionado de resistencia acelerada;
- $\bar{X}$ : Valor promedio de la resistencia acelerada para todos los datos usados para establecer la línea de regresión-

**B.2.2** La tercera columna en la Tabla 412B - 1 presenta las resistencias promedio estimadas a los 28 días a partir de las resistencias aceleradas anotadas en la columna 1. El valor de  $W_i$  para cada valor de  $X_i$  se incluye en la cuarta columna de la tabla. Finalmente, las columnas 5 y 6 registran los valores de los límites de confianza inferior y superior del 90 %, los cuales se muestran en la Figura 412B - 1. Se debe anotar que el ancho de la banda de confianza es más angosto cuando  $X_i$  es igual a  $\bar{X}$ , porque el último término bajo la raíz cuadrada de la fórmula de  $W_i$  se hace igual a cero.

**B.3** *Estimación de la resistencia futura.*

**16.1.1** A manera de ejemplo, supóngase que el promedio de resistencia acelerada de dos cilindros hechos en la obra con un mismo concreto es de 17.0 MPa. A partir de la ecuación de regresión antes calculada, la resistencia promedio estimada a los 28 días de los cilindros curados de forma convencional es 39.7 MPa. Si la resistencia acelerada fue conocida sin error, el intervalo del 90 % de confianza para el promedio de resistencia a los 28 días debería variar entre 38.8 y 40.6 MPa (Ver parte inferior de la Tabla 412B - 1). Sin embargo, la resistencia acelerada tiene una incertidumbre que es descrita por la desviación estándar de una amasada, la cual se puede estimar a partir de las diferencias entre las resistencias aceleradas de pares de cilindros. Se asume que las resistencias a la compresión medidas sobre los cilindros preparados en la obra por el método específico de ensayo acelerado tienen un coeficiente de variación del 3 % dentro de la amasada. Por lo tanto, la desviación estándar,  $s$ , a una resistencia promedio de 17.0 MPa, es 0.51 MPa. El intervalo del 90 % de confianza para el promedio de resistencia acelerada de los dos cilindros es el siguiente:

$$17.0 \pm z_{0.05} \frac{s}{\sqrt{2}} = 17.0 \pm 1.645 \times 0.51 \times 0.707 = 17.0 \pm 0.6 \text{ MPa}$$

**B.3.1.1** El valor de  $z_{0.05}$  corresponde al 5% del área bajo la curva de la distribución normal estándar. Así, entonces, el intervalo de confianza de 90 % para la resistencia acelerada promedio varía entre 16.4 y 17.6 MPa. Proyectando los límites de este intervalo a las líneas de confianza inferior y superior de la recta de regresión, corresponderán a valores entre 38.2 y 41.4 MPa para un intervalo de confianza aproximado del 90 % para las resistencias de cilindros curados en forma convencional durante 28 días. Cada medida diferente de resistencia acelerada produce un nuevo intervalo de confianza para la resistencia promedio a los 28 días.

**B.3.2** Una vez que la ecuación de regresión comience a ser usada en el proyecto, se deben preparar cilindros compañeros a la par con los cilindros que se usarán en pruebas de curado acelerado. Los cilindros compañeros serán sometidos a un curado convencional y se ensayarán a la compresión en el tiempo previsto. Las resistencias medidas en condiciones normales se deben comparar con los intervalos de confianza para las resistencias estimadas basadas en los valores

obtenidos de resistencia acelerada. Si las resistencias medidas caen por fuera de los intervalos de confianza estimados, resultan cuestionables la confiabilidad de la línea de regresión y los parámetros estadísticos asociados con la misma. Los resultados de nuevos cilindros compañeros se deben agregar al juego de datos de laboratorio para calcular una nueva recta de regresión y sus correspondientes parámetros estadísticos. Esta nueva recta se debe usar para las estimaciones posteriores de las resistencias futuras. La fabricación de nuevos cilindros compañeros para ambas condiciones de curado (acelerada y normal) deberá continuar hasta que las resistencias medidas caigan de manera consistente en los intervalos de confianza correspondientes. Una vez que ha sido demostrada la confiabilidad del procedimiento, los cilindros compañeros se deberán elaborar a intervalos aleatorios para reconfirmar que el procedimiento continúa siendo confiable.

#### **B.4** *Resumen.*

- B.4.1** Se ha descrito un procedimiento para estimar la resistencia promedio a los 28 días de cilindros sometidos a curado convencional, a partir de los resultados de ensayos de resistencia acelerada. El procedimiento tiene en cuenta las incertidumbres de la recta de regresión y de la resistencia acelerada medida. Es insuficiente usar simplemente la recta de regresión para convertir la resistencia acelerada en una resistencia equivalente a los 28 días. Finalmente, se enfatiza que una ecuación de regresión particular sólo es válida para un procedimiento específico de ensayo acelerado y una combinación de materiales. En consecuencia, cada laboratorio debe realizar suficientes ensayos con una serie de materiales dados y un procedimiento seguro para establecer la línea de regresión y las franjas de confianza, antes de que sea posible realizar estimaciones de las resistencias bajo curado convencional.