

FLUJO PLÁSTICO DEL CONCRETO EN COMPRESIÓN

INV E – 416 – 13

1 OBJETO

1.1 Este método de ensayo se emplea para la determinación del flujo plástico (*creep*) de cilindros de concreto moldeados, sometidos a la acción de una carga longitudinal compresiva. El método está limitado a concretos con agregados de tamaño máximo no mayor de 50 mm (2").

1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E-416-07.

2 IMPORTANCIA Y USO

2.1 Este método de ensayo mide la deformación por compresión inducida durante el tiempo por una carga, para edades escogidas del concreto, bajo una serie arbitraria de condiciones ambientales controladas.

2.2 Este método se puede usar para comparar los potenciales de flujo plástico de distintos concretos. Un procedimiento posible, consiste en utilizar la ecuación (o gráfica) desarrollada, para calcular esfuerzos a partir de los datos de deformación unitaria en estructuras de concreto masivo sin refuerzo. Para la mayoría de las aplicaciones de diseño específicas, las condiciones del ensayo fijadas en esta norma se deben modificar para simular de la manera más aproximada las condiciones anticipadas de curado, de temperatura, de exposición y de duración de la carga para el prototipo de estructura. Las teorías actuales y los efectos del material y de los parámetros del medio ambiente se encuentran en el documento ACI SP-9, Simposio sobre el flujo plástico del concreto, disponible en el Instituto Americano del Concreto.

2.3 Ante la ausencia de una hipótesis satisfactoria que gobierne el fenómeno del flujo plástico, se han desarrollado algunas suposiciones que, generalmente, se han confirmado a través de ensayos y de la práctica.

2.3.1 El flujo plástico (*creep*) es proporcional al esfuerzo para valores comprendidos entre 0 y 40 % de la resistencia a la compresión del concreto.

- 2.3.2** Se ha demostrado concluyentemente, que el flujo plástico es directamente proporcional al contenido de pasta, en el rango normal de contenidos de pasta utilizados en el concreto. Por lo tanto, las características de flujo plástico de mezclas de concreto que tienen agregados con tamaño máximo mayor de 50 mm (2"), se pueden determinar a partir del flujo plástico de la porción de menos de 50 mm (< 2"), obtenida por tamizado húmedo. El valor de esta característica se multiplica por la relación entre el contenido de pasta de cemento (en volumen) en la mezcla completa y el que tiene la muestra tamizada.
- 2.4** El uso de una expresión logarítmica (Sección 7), no implica que la relación entre el flujo plástico y el tiempo de deformación sea necesariamente una función logarítmica exacta; sin embargo, para un período de un año, la expresión se acerca al comportamiento normal de flujo plástico con la exactitud suficiente para hacer posible el cálculo de parámetros que son útiles para la comparación de concretos.
- 2.5** No hay datos que puedan fundamentar la extrapolación a la torsión o a la tensión de los resultados de este ensayo de compresión.

3 EQUIPO

- 3.1** *Moldes* – Deben ser cilíndricos y cumplir los requerimientos de la norma INV E-402. Si se requiere, se pueden hacer provisiones para instalar insertos y contactos para medidores, así como para fijar placas de soporte integral a los extremos del espécimen a medida que se funde.
- 3.1.1** Los moldes horizontales deben cumplir los requerimientos del numeral 3.2.2 de la norma INV E-402. Un molde horizontal satisfactorio se muestra en la Figura 416 - 1.

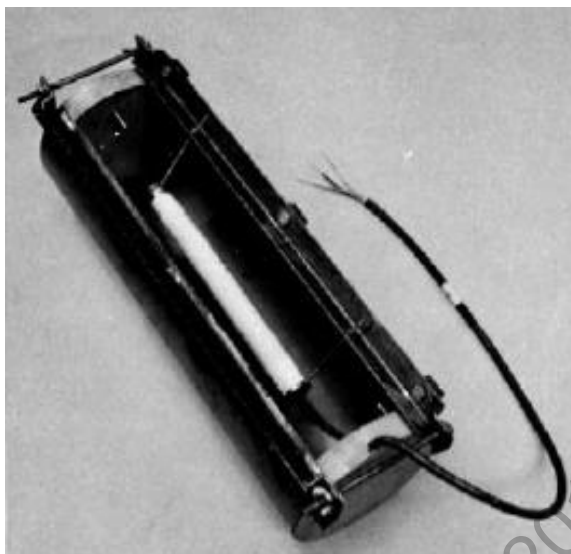


Figura 416 - 1. Molde horizontal para especímenes de creep

3.2 Marco de carga – Capaz de aplicar y mantener la carga requerida sobre el espécimen, independientemente de cualquier cambio en las dimensiones de éste. En su forma más simple, el marco de carga consiste en placas cabezales apoyadas sobre los extremos de los especímenes cargados, un elemento para mantener la carga que puede ser un resorte, una cápsula hidráulica o un pistón, y varillas roscadas para tomar la reacción del sistema cargado. Las superficies de apoyo de las placas cabezales no se deben apartar de la planitud en más de 0.025 mm (0.001"). En cualquier marco de carga se pueden apilar varios especímenes para cargarlos simultáneamente. La longitud entre las placas cabezales no debe exceder de 1780 mm (70"). Cuando se utiliza un elemento hidráulico para mantener la carga, se pueden cargar simultáneamente varios marcos de carga por medio de una unidad central hidráulica de regulación de presión, integrada por un acumulador, un regulador, manómetros y una fuente de alta presión, tal como un cilindro de nitrógeno o una bomba de alta presión. Se pueden utilizar resortes, como los del sistema amortiguador de los vagones de ferrocarril, para mantener la carga sobre los marcos, de manera similar a la recién descrita. La compresión inicial se debe aplicar por medio de un gato portátil o una máquina de ensayo. Cuando se usen resortes, se deberá cuidar que se disponga de una cabeza esférica o una junta de bola y que las placas de los extremos sean suficientemente rígidas para asegurar una carga uniforme sobre los cilindros. Las Figuras 416 - 2 y 416 - 3 muestran marcos de carga con resortes que resultan aceptables. Se debe disponer de medios para medir la carga con una exactitud del 2 % de la carga total aplicada. Se puede usar un manómetro hidráulico con instalación fija o un gato hidráulico y una celda de carga insertada en el marco cuando se aplica o se ajusta la carga.

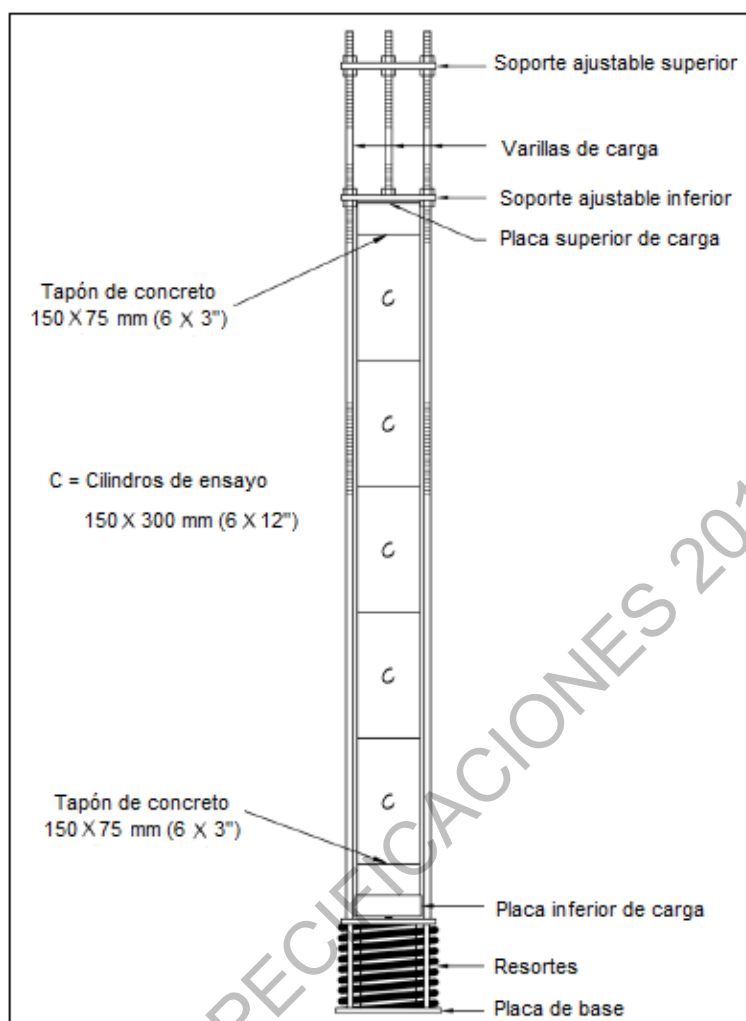


Figura 416 - 2. Esquema de marco de carga con resorte para el ensayo de *creep*

- 3.3** *Dispositivo para medir la deformación* – Los aparatos utilizados deberán medir la deformación unitaria longitudinal en el espécimen, con aproximación a 10 millonésimas. El dispositivo puede estar integrado al aparato, puede ser instalado, o ser portátil. Si se utiliza uno portátil, los puntos de contacto se deberán marcar sobre el espécimen en forma notoria. No se permitirá el uso de deformímetros que dependan del contacto por fricción. Si se utiliza un medidor embebido, deberá estar situado de manera que su movimiento de deformación ocurra a lo largo del eje longitudinal del cilindro. Si se utilizan dispositivos externos, las deformaciones unitarias se deben medir sobre no menos de dos líneas de medidores, espaciadas uniformemente alrededor de la periferia del espécimen. Los medidores se pueden instrumentar de modo que la deformación promedio sobre todas las líneas se pueda leer directamente. La longitud de medida efectiva debe ser, al menos, tres veces el tamaño máximo del agregado del concreto. El dispositivo medidor de deformaciones debe ser

capaz de medirlas durante un lapso mínimo de un año sin requerir cambios en la calibración.

Nota 1: Los sistemas en los cuales las variaciones de las deformaciones se comparan con una barra normalizada de longitud constante son los más confiables, aunque los medidores eléctricos de deformación son apropiados.



Figura 416 - 3. Marcos de carga con resorte para el ensayo de flujo plástico

4 ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 4.1** *Tamaño del espécimen* – El diámetro de cada espécimen debe ser de 150 ± 1.5 mm ($6 \pm 1/16$ ") y la longitud será, por lo menos, de 290 mm ($11 \frac{1}{2}$ "). Cuando los extremos del espécimen están en contacto con las placas de carga de acero, la longitud del espécimen debe ser, por lo menos, igual a la longitud del aparato medidor de deformaciones más el diámetro del espécimen. Cuando los extremos del espécimen están en contacto con otros especímenes de concreto similares al que se está ensayando, la longitud del espécimen debe ser, por lo menos, igual a la del medidor de longitudes del dispositivo de medición de deformaciones más 40 mm ($1 \frac{1}{2}$ "). Entre el espécimen de ensayo y la placa de carga de acero en cada extremo de una pila se debe instalar un cilindro adicional no instrumentado, cuyo diámetro sea igual al del cilindro que se ensaya y cuya longitud sea, al menos, igual a la mitad de su diámetro.
- 4.2** *Fabricación de especímenes* – El tamaño máximo del agregado no deberá exceder de 50 mm (2") (Sección 2). Los cilindros fundidos verticalmente se deben fabricar conforme a lo indicado en la norma INV E-402. Los extremos de cada cilindro deberán cumplir los requisitos de planitud de la norma INV E-403 (nota 2). Los cilindros fundidos horizontalmente se deben consolidar por

un método adecuado a la consistencia del concreto, como se indica en el numeral 6.4 de la norma INV E-402. Se deberá poner mucha atención para que la varilla apisonadora o el vibrador no golpeen el medidor de deformación. Cuando se utilice vibración, el concreto se debe colocar en una sola capa y el elemento vibrador no deberá tener más de 35 mm (1.3") de diámetro. Si la compactación se hace por apisonado, el concreto se debe colocar en dos capas aproximadamente iguales y cada capa se deberá someter a 25 golpes de varilla, uniformemente distribuidos a cada lado del medidor de deformación. Después de la consolidación, el concreto se debe enrasar con un palustre o llana, manipulándolo lo menos posible para conformar el concreto en la abertura concéntricamente con el resto del espécimen. Se puede usar una plantilla curvada con el mismo radio del espécimen como emparejadora, para darle forma y acabado más precisos al concreto en la abertura.

Nota 2: Los requisitos de planitud de las bases de los especímenes cilíndricos se pueden lograr por refrentado, recubrimiento o, al momento de fundir, fijando los extremos con placas de soporte normales al eje del cilindro.

- 4.3 Número de especímenes** – Para cada condición de ensayo, se deberán elaborar no menos de seis (6) especímenes (nota 3) de una amasada de concreto; dos se ensayan por resistencia a la compresión, dos se cargan para observar la deformación total y dos permanecerán sin carga para usarlos como controles para indicar deformaciones debidas a causas diferentes a las cargas. Cada uno de los especímenes para resistencia y control se deberá someter a los mismos tratamientos de almacenamiento y curado que el espécimen cargado.

Nota 3: Se recomienda que los especímenes se ensayen por triplicado, aunque resulta aceptable ensayar solamente dos.

5 CURADO Y ALMACENAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES

- 5.1 Curado normal** – Antes de desmoldarlos, los especímenes se deben almacenar a $23 \pm 2.0^{\circ} \text{ C}$ ($73.5 \pm 3.5^{\circ} \text{ F}$) y cubrir para evitar la evaporación. Los especímenes se deben extraer de los moldes no antes de 20 horas ni después de 48 horas después de su fabricación, y se deben almacenar en un ambiente húmedo a una temperatura de $23 \pm 2.0^{\circ} \text{ C}$ ($73.5 \pm 3.5^{\circ} \text{ F}$) hasta que cumplan 7 días. Un ambiente húmedo es aquel en el cual se mantiene permanentemente agua libre sobre toda la superficie de los especímenes. Los especímenes no se deben someter a chorros de agua corriente ni almacenar sumergidos en agua. Una vez terminado el curado húmedo, los especímenes se deben almacenar a una temperatura de $23.0 \pm 1.0^{\circ} \text{ C}$ ($73.5 \pm 1.8^{\circ} \text{ F}$) y con una humedad relativa del $50 \pm 4\%$, hasta la terminación del ensayo.

- 5.2** *Curado básico para flujo plástico* – Si se desea prevenir la pérdida o la ganancia de agua durante el almacenamiento y el período de ensayo, los especímenes se deben guardar y sellar dentro de envolturas impermeables (por ejemplo, de cobre o de caucho de butilo) en el momento de su fabricación o desmolde para evitar pérdidas de humedad por evaporación, y deberán permanecer sellados durante todo el período de almacenamiento y curado.
- 5.3** *Régimen de temperatura variable de curado* – Cuando se desee introducir el efecto de la temperatura sobre las propiedades elásticas e inelásticas del concreto (como, por ejemplo, las condiciones de temperatura adiabática que se presentan en el concreto masivo o las condiciones de temperatura a las cuales se ve sometido el concreto durante el curado acelerado), se debe controlar la temperatura del lugar de almacenamiento del espécimen, para que corresponda a la temperatura histórica deseada. El usuario es el responsable de establecer la historia tiempo-temperatura que se debe seguir y el rango admisible de la desviación resultante.
- 5.4** *Otras condiciones de curado* – Se pueden utilizar otras condiciones sobre edades de ensayo y ambientes de curado, cuando se requiera esta información para aplicaciones específicas. En este caso, dichas condiciones se deberán detallar ampliamente en el informe.

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** *Edad para el ensayo* – Cuando el propósito del ensayo sea comparar el potencial de flujo plástico de diferentes concretos, los especímenes se cargan durante 28 días. Cuando se quiera conocer el comportamiento completo del flujo plástico de un concreto dado, se deberán preparar especímenes para una carga inicial a los 2, 7, 28 y 90 días, y a un año. Si se necesita información para otras edades de carga, ellas se deberán incluir en el informe.
- 6.2** *Detalles de carga* – Inmediatamente antes de cargar los especímenes en condiciones de flujo plástico, se determina la resistencia a la compresión de los cilindros de resistencia, de acuerdo con la norma INV E-410. En el momento de colocar en el dispositivo de carga los especímenes sin sellar para flujo plástico, se cubren los extremos de los cilindros de control para evitar pérdidas de humedad (nota 4). Se cargan los especímenes con una intensidad de carga no mayor al 40 % de la resistencia a la compresión a la edad de carga. Se toman lecturas de deformación inmediatamente antes y después de la carga, 2 y 6 horas más tarde y, después, diariamente durante 1 semana, semanalmente hasta cumplir 1 mes y mensualmente hasta cumplir 1 año.

Antes de tomar cada lectura de deformación, se debe medir la carga. La carga se deberá ajustar siempre que varíe en más de 2% en relación con el valor correcto (nota 5). Las lecturas de deformación sobre los especímenes de control se toman siguiendo el mismo calendario de los especímenes cargados.

Nota 4: Al colocar en el marco los especímenes para el ensayo de flujo plástico, se debe tener cuidado en alinearlos para evitar la excentricidad de la carga. Cuando los cilindros están apilados y se usan medidores externos, puede ser conveniente aplicar una pequeña precarga que produzca un esfuerzo que no exceda de 1380 kPa (200 lbf/pg²) y se anota la variación de la deformación alrededor de cada espécimen, luego de lo cual se puede remover la carga y realinear los especímenes para una mayor uniformidad en la deformación.

Nota 5: Cuando se usen resortes para mantener la carga, el ajuste se puede llevar a cabo aplicando la carga correcta y apretando las tuercas en las varillas roscadas de reacción.

7 CÁLCULOS

- 7.1** Se calcula la deformación unitaria total inducida por la carga por unidad de esfuerzo en cualquier momento, como la diferencia entre los valores promedio de deformación unitaria de los especímenes cargados y de los de control, dividida por el esfuerzo promedio. Para determinar la deformación unitaria por flujo plástico por unidad de esfuerzo [MPa (lbf/pg²)] a cualquier edad, se resta de la deformación unitaria por unidad de esfuerzo inducida por la carga total a esa edad, la deformación unitaria por unidad de esfuerzo inmediatamente después de la carga. Si se desea, se puede graficar la deformación unitaria total por unidad de esfuerzo en coordenadas semilogarítmicas, donde el eje logarítmico representa el tiempo (Figura 416 - 4), para determinar las constantes 1/E y F(K) de la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{1}{E} + F(K) \ln(t + 1) \quad [416.1]$$

Donde: ϵ : Deformación unitaria total por unidad de esfuerzo, MPa⁻¹, (lbf/pg²)⁻¹;

E: Módulo elástico instantáneo MPa, (lbf/pg²);

F(K): Velocidad de flujo plástico (*creep*), calculada como la pendiente de la recta que representa la curva de flujo plástico en el gráfico semilogarítmico;

t: Tiempo a partir de la aplicación de la carga, días.

- 7.1.1** El valor $1/E$ es la deformación unitaria elástica inicial por unidad de esfuerzo, la cual se determina a partir de las lecturas de deformación tomadas inmediatamente antes y después de cargar el espécimen. Si la carga no se llevó a cabo de manera expedita, se puede producir algo de flujo plástico (*creep*) antes de que se observe la deformación después de aplicar la carga, caso en el cual se puede usar la extrapolación al tiempo cero por el método de los mínimos cuadrados para determinar esta cantidad.

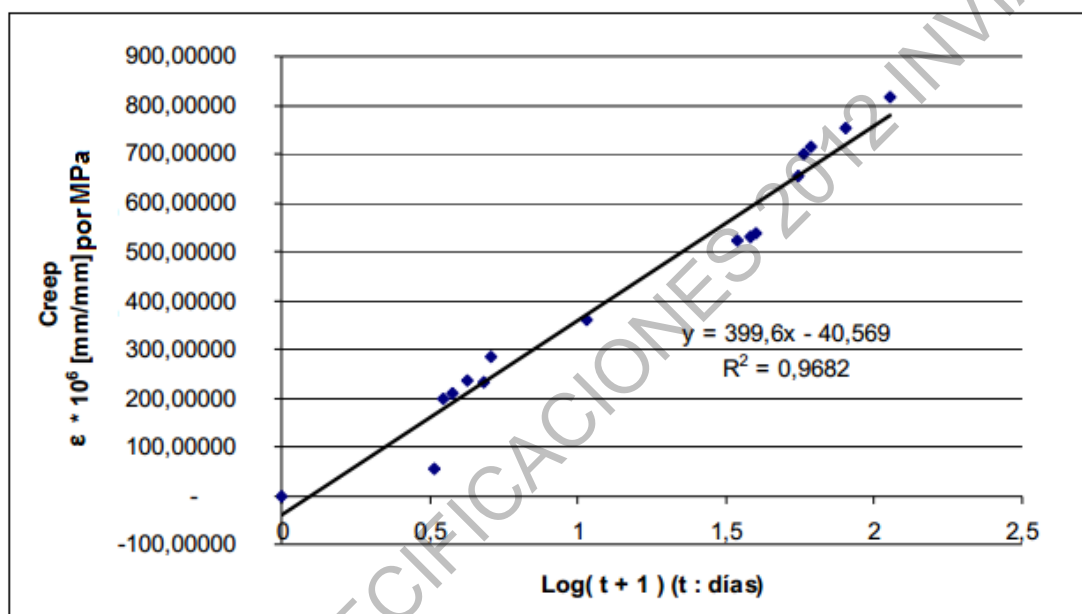


Figura 416 - 4. Ejemplo de relación deformación por flujo plástico vs tiempo para muestras de 90 días de edad

8 INFORME

- 8.1** El informe deberá incluir lo siguiente:

- 8.1.1** Contenido de cemento, relación agua/cemento, tamaño máximo del agregado, asentamiento, y contenido de aire.
- 8.1.2** Tipo y origen del cemento, de los agregados, del aditivo y del agua de mezclado.
- 8.1.3** Posición del cilindro cuando fue fundido.
- 8.1.4** Condiciones de almacenamiento antes y después de la carga.

- 8.1.5 Edad del espécimen en el instante de someterlo a la carga.
- 8.1.6 Resistencia a la compresión a la edad de carga.
- 8.1.7 Tipo de dispositivo para medir deformaciones.
- 8.1.8 Magnitud de cualquier precarga.
- 8.1.9 Intensidad de la carga aplicada.
- 8.1.10 Deformación elástica inicial.
- 8.1.11 Deformación de flujo plástico (*creep*) por unidad de esfuerzo, a las edades especificadas hasta un año.
- 8.1.12 Velocidad de flujo plástico (*creep*), $F(K)$, si se ha determinado.

9 PRECISIÓN Y SESGO

- 9.1 *Precisión* – Se ha determinado que el coeficiente de variación para un solo operador y una sola amasada se encuentra alrededor de 4 %, y que el coeficiente de variación para un solo operador y varias amasadas de concreto se encuentra alrededor del 9 %, sobre un rango de deformaciones unitarias por flujo plástico (*creep*) de 250 a 2000 millonésimas. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos conducidos adecuadamente por el mismo operador sobre el mismo material, no deben diferir en más de 6 % de su promedio. Los resultados de dos ensayos conducidos adecuadamente por el mismo operador sobre material fundido de diferentes amasadas no deben diferir en más de 13 % de su promedio.
- 9.2 *Sesgo* – Este método de ensayo no tiene sesgo, por cuanto los valores determinados sólo se pueden definir en términos del método de ensayo.

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM C512/C512 M – 10