

MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON DEL CONCRETO EN COMPRESIÓN

INV E – 424 – 13

1 OBJETO

1.1 Este método de ensayo cubre la determinación de: (1) el módulo cuerda de elasticidad (módulo de Young) y (2) la relación de Poisson de cilindros de concreto moldeados y de núcleos de concreto taladrados, cuando se someten a esfuerzos de compresión longitudinal.

2 DEFINICIONES

- 2.1** *Módulo cuerda* – Pendiente de la cuerda trazada entre dos puntos específicos en la curva esfuerzo – deformación.
- 2.2** *Relación de Poisson, μ* – Valor absoluto de la relación entre la deformación transversal y la deformación axial correspondiente, resultante del esfuerzo axial uniformemente distribuido por debajo del límite proporcionalidad del material.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** Este método de ensayo proporciona un valor de la relación esfuerzo – deformación unitaria, y una relación entre las deformaciones unitarias transversal y longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y condiciones de curado establecidas.
- 3.2** Los valores del módulo de elasticidad y de la relación de Poisson, aplicables dentro del rango de esfuerzos de trabajo acostumbrados (0 a 40 % de la resistencia última del concreto), se pueden usar para el dimensionamiento de miembros estructurales reforzados y no reforzados, para la determinación de la cantidad del refuerzo y para calcular los esfuerzos para las deformaciones unitarias observadas.
- 3.3** Los valores obtenidos del módulo de elasticidad son usualmente menores que los obtenidos bajo una aplicación rápida de carga (por ejemplo, a velocidades dinámicas o sísmicas) y, generalmente, son mayores que los valores obtenidos

bajo una carga de aplicación lenta o de gran duración, manteniendo constantes las demás condiciones de ensayo.

4 EQUIPO

- 4.1** *Máquina de ensayo* – Se puede usar cualquier tipo de máquina de ensayo capaz de imponer una carga a la velocidad y a la magnitud establecidas en el numeral 6.4. La máquina debe cumplir los requisitos de la sección referente a Máquinas de Ensayo del Tipo CRT de la Práctica ASTM E 4. El cabezal esférico y los bloques de apoyo estarán de acuerdo con lo indicado en la Sección 4 de la norma de ensayo INV E-410.
- 4.2** *Compresómetro* – Para determinar el módulo de elasticidad, se debe disponer de un dispositivo sensor adherido o no al espécimen (nota 1), que mida con una aproximación de 5 millonésimas la deformación promedio de dos líneas de base diametralmente opuestas, cada una paralela al eje axial y centrada cerca de la mitad de la altura del espécimen. La longitud efectiva de cada línea de base no deberá ser menor que tres veces el tamaño máximo del agregado en el concreto, ni mayor que $2/3$ de la altura del espécimen; la longitud preferida de la línea de base es la mitad de la altura del espécimen. Se pueden emplear deformímetros con puntos de medida embebidos o adheridos al espécimen y leer la deformación de las líneas de manera independiente; o se puede usar un compresómetro (como el mostrado en la Figura 424 - 1) constituido por dos anillos, uno de los cuales (ver B en la Figura 424 - 1) está fijado rígidamente al espécimen, mientras el otro (ver C en la Figura 424 - 1), está fijado en dos puntos diametralmente opuestos, de manera que tenga libertad de rotación. En un punto de la circunferencia del anillo rotativo, a mitad de camino entre los dos puntos de soporte, se deberá usar una barra pivote (ver A en la Figura 424 - 1) para mantener una distancia constante entre los dos anillos. En el punto opuesto en la circunferencia del anillo rotativo (C), el cambio de distancia entre los dos anillos (esto es, la lectura del deformímetro), es igual a la suma del desplazamiento debido a la deformación del espécimen más el desplazamiento debido a la rotación del anillo con respecto a la barra pivote (ver Figura 424 - 2).

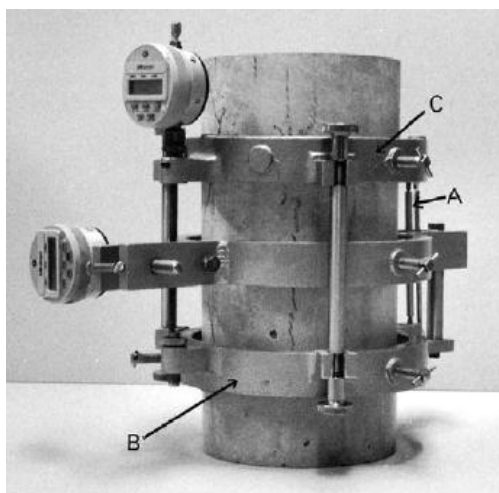


Figura 424 - 1. Compresómetro

- 4.2.1** La deformación se puede medir directamente por medio de un indicador de cuadrante (dial) o mediante un sistema multiplicador de palanca, por un dilatómetro de alambre o por un transformador diferencial lineal variable (TDLV). Si las distancias desde la barra pivote y desde la línea de base de medida del deformímetro hasta el plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo rotativo son iguales, la deformación del espécimen es igual a la mitad de la lectura del deformímetro. Si estas distancias no son iguales, la deformación se deberá calcular de la siguiente manera:

$$d = \frac{g \times e_r}{(e_r + e_g)} \quad [424.1]$$

- Donde: d: Deformación total del espécimen a lo largo de la longitud de base efectiva, μm ($\mu\text{pg.}$);
- g: Lectura del deformímetro, μm ($\mu\text{pg.}$);
- e_r : Distancia perpendicular, mm (pg.), con aproximación de 0.2 mm (0.01"), desde la barra pivote hasta el plano vertical que pasa por los dos puntos de soporte del anillo rotativo;
- e_g : Distancia perpendicular, mm (pg.), con aproximación de 0.2 mm (0.01"), desde el deformímetro hasta el plano vertical que pasa por los dos puntos de soporte del anillo rotativo.

Nota 1: Aunque los deformímetros adheridos son satisfactorios en los especímenes secos, puede ser difícil, si no imposible, montarlos en especímenes curados en húmedo continuamente antes del ensayo.

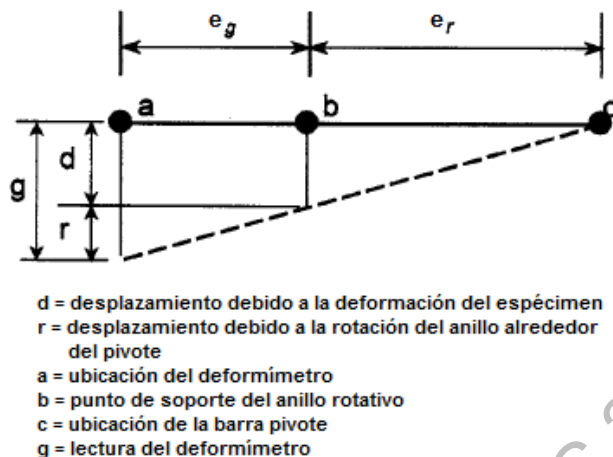


Figura 424 - 2. Diagrama de desplazamientos

- 4.3 Extensómetro** - Si se desea obtener también la relación de Poisson, se debe determinar la deformación transversal (1) mediante un extensómetro no adherido capaz de medir con una aproximación de $0.5 \mu\text{m}$ ($25 \mu\text{pg.}$) el cambio del diámetro en la mitad de la altura del espécimen, o (2) mediante dos medidores de deformación adheridos (nota 1), montados circunferencialmente en puntos diametralmente opuestos a la mitad de la altura del espécimen, y capaces de medir la deformación circunferencial con una aproximación de 5 millonésimas. Un aparato que combine compresómetro y extensómetro (Figura 424 - 3) es un dispositivo no adherido conveniente. Este aparato debe contener un tercer anillo (consistente en dos segmentos iguales) localizado a medio camino entre los dos anillos del compresómetro y fijado al espécimen en dos puntos diametralmente opuestos. Entre estos dos puntos se ubica una barra pivote corta (A' , ver Figura 424 - 3), adyacente a la barra pivote larga, para mantener una distancia constante entre el anillo inferior y el intermedio. El anillo intermedio debe ser articulado en el punto de pivote para permitir la rotación de los dos segmentos del anillo en el plano horizontal. En el punto opuesto de la circunferencia, los dos segmentos se deben conectar a través de un dial u otro aparato sensible, capaz de medir la deformación transversal con una aproximación de $1.27 \mu\text{m}$ ($50 \mu\text{pg.}$). Si las distancias desde la articulación y desde el deformímetro al plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo intermedio son iguales, la deformación transversal del diámetro del espécimen es igual a la mitad en la lectura del deformímetro. Si

estas distancias no son iguales, la deformación transversal del diámetro del espécimen se debe calcular con la siguiente ecuación:

$$d = \frac{g' \times e'_h}{(e'_h + e'_g)} \quad [424.2]$$

- Donde: d' : Deformación transversal del diámetro del espécimen, μm ($\mu\text{pg.}$);
- g' : Lectura del deformímetro transversal, μm ($\mu\text{pg.}$);
- e'_h : Distancia perpendicular, (medida en mm o pg.) con una aproximación de 0.2 mm (0.01"), desde la articulación hasta el plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo intermedio;
- e'_g : Distancia perpendicular, (medida en mm o pg.) con una aproximación de 0.2 mm (0.01"), desde el deformímetro hasta el plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo intermedio.

4.4 Balanza o báscula – Con exactitud de 50 g (0.1 lb), si se requiere.

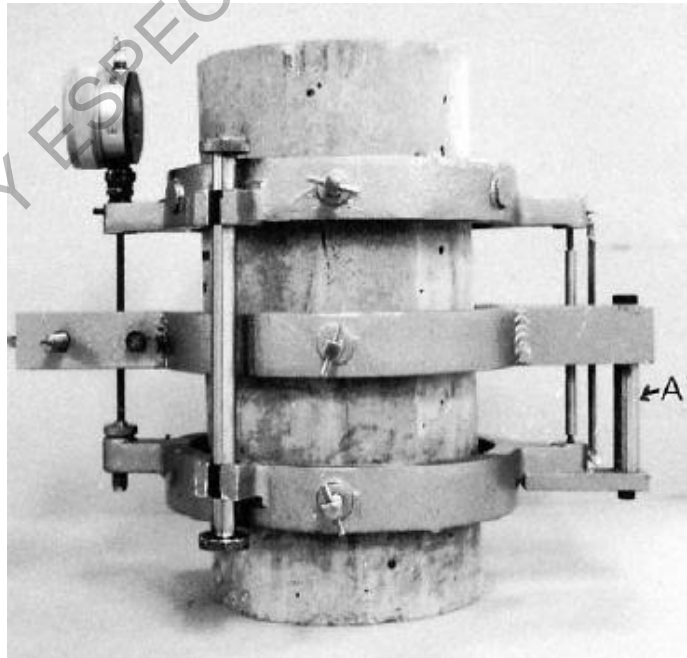


Figura 424 - 3. Combinación compresómetro – extensómetro

5 ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 5.1** *Especímenes cilíndricos moldeados* – Los cilindros para ensayo se deberán moldear de acuerdo con los requisitos para la elaboración de muestras de concreto para ensayo a compresión de las normas INV E-402 o INV E-410. Los especímenes se deben someter a las condiciones de curado especificadas y ensayar a la edad a la cual se desea la información del módulo de elasticidad. Los especímenes se deben ensayar dentro de la hora siguiente a su remoción del tanque o cuarto húmedo de curado. Los especímenes removidos de un cuarto húmedo se deberán mantener húmedos mediante una lona húmeda que los cubra durante el intervalo entre la remoción y el ensayo.
- 5.2** *Núcleos taladrados* – Los núcleos deben cumplir con los requerimientos de extracción y las condiciones de humedad aplicables a los especímenes para determinar la resistencia a la compresión, de acuerdo con la norma de ensayo INV E-418, excepto que solamente se deben usar núcleos taladrados con broca de puntas de diamante, con una relación de longitud /diámetro mayor de 1.5. Los requerimientos relativos al almacenamiento y a las condiciones ambientales previas al ensayo, serán los mismos que para los especímenes cilíndricos moldeados.
- 5.3** Los extremos de los especímenes de ensayo deben ser perpendiculares a su eje (con tolerancia de $\pm 0.5^\circ$) y planos dentro de 0.05 mm (0.002"). Si el espécimen no reúne los requisitos de planitud, se deberán nivelar mediante refrentado de acuerdo con la norma INV E-403, o por medio de pulido o esmerilado. Las cavidades formadas por fractura de agregados que se presenten en los extremos del espécimen pueden ser reparadas, con tal que el área total de ellas no exceda el 10 % del área del espécimen y que las reparaciones se hagan antes de completar el refrentado o el esmerilado (nota 2). El espécimen será considerado plano dentro de la tolerancia, cuando una lámina calibradora de 0.05 mm (0.002") no pueda pasar entre la superficie del espécimen y una regla metálica recta apoyada contra la superficie.
- Nota 2: Las reparaciones de las cavidades se pueden hacer pegando de nuevo en su lugar los agregados desalojados con material epóxico o llenando los vacíos con material para el refrentado, y permitiendo un tiempo adecuado para su endurecimiento.*
- 5.4** El diámetro del espécimen de ensayo se debe medir con un calibrador, con aproximación de 0.2 mm (0.01"), promediando dos diámetros medidos perpendicularmente entre sí, cerca del centro de la longitud del espécimen. Este diámetro promedio se usará para calcular el área de la sección transversal. Se mide y anota la longitud del espécimen moldeado, incluyendo el refrentado, con una aproximación de 2 mm (0.1"). La longitud de los

especímenes taladrados se debe medir de acuerdo con la norma de ensayo INV E-419 y su longitud, incluyendo el refrentado, se debe reportar con una aproximación de 2 mm (0.1").

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1 Durante el ensayo, se deben mantener la temperatura ambiente y la humedad tan constantes como sea posible. Se deberá registrar en el informe cualquier fluctuación inusual de ellas.
- 6.2 Se deben usar especímenes compañeros (duplicados) para determinar la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma INV E-410, antes del ensayo para determinar el módulo de elasticidad.
- 6.3 Se coloca el espécimen, con el equipo medidor de deformaciones instalado, sobre la platina inferior o bloque de apoyo de la máquina de ensayo. Se alinea cuidadosamente el eje del espécimen con el centro de empuje del bloque de carga superior. Se anota la lectura de los indicadores de deformación. A medida que el bloque superior es llevado lentamente a asentarse sobre el espécimen, se rota suavemente con las manos la parte móvil del bloque hasta que se obtenga un apoyo uniforme.
- 6.4 Se carga el espécimen al menos dos veces. Durante la primera carga no se debe registrar ningún dato. Los cálculos se deberán basar en los promedios de los resultados de las cargas subsecuentes (nota 3). Durante la primera carga, la cual es principalmente para ajustar los deformímetros, se observa el comportamiento de éstos (nota 4), y se corrige cualquier anomalía antes de la segunda carga. Cada conjunto de lecturas se debe obtener como sigue: Se aplica la carga continuamente y sin impactos. La máquinas de ensayo del tipo tornillo se ajustan de manera que el cabezal móvil se mueva a una velocidad aproximada de 1 mm/min (0.05 pg/min) cuando la máquina esté funcionando en vacío. En máquinas operadas hidráulicamente, la carga se debe aplicar a una velocidad constante dentro del rango 250 ± 50 kPa/s (35 ± 7 lbf/pg²/s). Sin interrumpir el ensayo, se registran la carga aplicada y la deformación unitaria longitudinal en los instantes en que (1) la deformación unitaria longitudinal es 50 millonésimas y (2) la carga aplicada es igual al 40 % de la carga última (ver numeral 6.5). La deformación unitaria longitudinal es igual a la deformación longitudinal total dividida por la longitud efectiva de medida. Si se desea determinar la relación de Poisson, se registra la deformación unitaria transversal en los mismos puntos. Si se desea obtener la curva esfuerzo-deformación, se deberán tomar lecturas en dos o más puntos intermedios sin

interrupción de la carga; o usar un instrumento que realice un registro continuo. Inmediatamente después de alcanzar la carga máxima, excepto en la carga final, se reduce la carga hasta cero a la misma velocidad con que fue aplicada. Si el observador falla en obtener una lectura, se debe completar el ciclo de carga y luego repetirlo. El ciclo extra se deberá registrar en el informe.

Nota 3: Se recomiendan, como mínimo, dos cargas subsecuentes para que se pueda notar la repetitividad del ensayo.

Nota 4: Cuando se emplee un deformímetro de carátula para medir la deformación longitudinal, es conveniente ajustarlo antes de cada carga, de manera que el indicador pase por el punto cero cuando la deformación unitaria longitudinal sea 50 millonésimas.

- 6.5** Se permite obtener el módulo de elasticidad y la resistencia en el mismo ciclo de carga, siempre y cuando los deformímetros sean desechables, removibles o adecuadamente protegidos para cumplir con los requerimientos sobre carga continua dados en la norma de ensayo INV E-410. En este caso, se deben registrar varias lecturas y determinar, mediante interpolación, el valor de la deformación unitaria al 40 % de la carga última.
- 6.6** Si se toman lecturas intermedias, se deben graficar los resultados de cada uno de los tres ensayos con la deformación unitaria longitudinal en las abscisas y el esfuerzo de compresión en las ordenadas. El esfuerzo de compresión se calcula dividiendo el valor de la carga en la máquina de ensayo por el área de la sección transversal del espécimen, determinada de acuerdo con el numeral 5.4.

7 CÁLCULOS

- 7.1** Se calcula el módulo de elasticidad, con aproximación a 200 MPa (50 000 lbf/pg²), como sigue:

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)} \quad [424.3]$$

Donde E: Módulo cuerda de elasticidad, MPa (lbf/pg²);

S₂: Esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última, MPa (lbf/pg²);

S₁: Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ϵ_1 , de 50 millonésimas, MPa (lbf/pg²);

ϵ_2 : Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S_2 , μm ($\mu\text{pg.}$).

7.2 Se calcula la relación de Poisson, con una aproximación de 0.01, como sigue:

$$\mu = \frac{(\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1})}{(\epsilon_2 - 0.000050)} \quad [424.4]$$

Donde: μ : Relación de Poisson;

ϵ_{t2} : Deformación unitaria transversal en la mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo S_2 , μm ($\mu\text{pg.}$);

ϵ_{t1} : Deformación unitaria transversal en la mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo S_1 , μm ($\mu\text{pg.}$).

8 INFORME

8.1 Se debe reportar la siguiente información:

8.1.1 Número de identificación del espécimen.

8.1.2 Dimensiones del espécimen, mm (pg.).

8.1.3 Historia del curado y medio ambiente del espécimen.

8.1.4 Edad del espécimen.

8.1.5 Resistencia del concreto, si se determinó.

8.1.6 Densidad del concreto, si se determinó.

8.1.7 Curva esfuerzo–deformación, si se dibujó.

8.1.8 Módulo cuerda de elasticidad, MPa (lbf/pg²).

8.1.9 Relación de Poisson, si se determinó.

9 PRECISIÓN Y SESGO

- 9.1** *Precisión* – La precisión para amasadas múltiples realizadas por un solo operador y la misma máquina es $\pm 4.25\%$ (R1S %) máximo (como se define en la Práctica ASTM E177), sobre un rango de 17 a 28×10^6 Pa (2.5 a 4×10^6 lbf/pg²); por lo tanto, los resultados de ensayos de cilindros duplicados de diferentes amasadas no deben diferir en más del 5 % del promedio de los dos.
- 9.2** *Sesgo* – Este método de ensayo no tiene sesgo, porque los valores determinados se pueden definir únicamente en términos del método de ensayo.

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM C469/C469M – 10