

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

680-17 ENSAYO DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGON FRESCO

(Tests of properties of fresh concrete)

Sven G. Bergström

De: "MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH", nº 11, Oct. 1952, pág. 55

- - -

Las propiedades del hormigón fresco han constituido objeto de estudio por parte del Instituto Sueco de Investigaciones sobre el Cemento y el Hormigón, prácticamente desde el comienzo de sus actividades en 1942. El objetivo fundamental de estos estudios era la construcción de un aparato de medida que proporcionase sobre el hormigón fresco una información más amplia que la que puede obtenerse por medio de los diversos viscosímetros, que, en su mayor parte, han sido proyectados para ensayos ordinarios in situ.

En el trabajo que comentamos se informa sobre los principales resultados obtenidos hasta la fecha en los estudios realizados por el autor en colaboración con A. Eistrat. Estas investigaciones tienen en particular el fin de estudiar, por medio del aparato en cuestión, la variación de las propiedades del hormigón en función del tiempo de compactación, y determinar la relación que existe entre esta variación y la calidad del hormigón.

El aparato de medida construido es un viscosímetro en principio, y en los primeros ensayos se interpretó que la magnitud medida era la fluidez del hormigón fresco. Sin embargo, los

estudios posteriores realizados en el Departamento de Física del citado centro sueco pusieron de manifiesto que el hormigón fresco debe considerarse, más bien que como un fluido, como material elástico susceptible de experimentar deformaciones plásticas. De acuerdo con esto se considera ahora que la magnitud que mide el aparato es la deformabilidad del hormigón fresco.

En el aparato construido, las oscilaciones libres naturales de un sistema son amortiguadas por el hormigón, aumentando la magnitud del amortiguamiento al disminuir la deformabilidad. El sistema oscilante consiste en un eje vertical de torsión 1 (fig. 8), cuyo extremo inferior se adapta al hormigón por medio de una ruedecita 2. El recipiente 3 se llena con el hormigón. El eje ejecuta oscilaciones de torsión cuya frecuencia puede controlarse por medio de los pesos 4, montados en los brazos transversales del eje. El recipiente del hormigón está unido por medio de tornillos a un vibrador 5; de este modo las medidas pueden realizarse mientras se vibra el hormigón, o estando éste en reposo. En ambos casos puede variarse el tiempo de vibración.

La oscilación se inicia por un impulso instantáneo producido al descargar unas baterías de condensadores por medio de los electroimanes fijos a los extremos de uno de los brazos transversales. Las oscilaciones se registran sobre una película por medio de un dispositivo fotoeléctrico.

En los ensayos realizados hasta la fecha, la amplitud máxima del sistema ha variado desde unos 0,003 a 0,005 radianes, y el periodo de oscilación de 0,7 a 0,8 segundos. El vibrador es el empleado en el consistómetro VB (aceleración 3g, frecuencia 50 ciclos por segundo), muy usado en Suecia para controlar la consistencia del hormigón. Actualmente, los oscilogramas se re-

gistran a intervalos de 15 segundos a lo largo de un período de unos 5 minutos.

Dado que sólo puede obtenerse una medida absoluta de la deformabilidad a través de un tratamiento matemático muy complicado, en el que se tengan en cuenta las condiciones en los límites y la variación de la resistencia al esfuerzo cortante en función de la deformación, se expresa la deformabilidad por medio de valores relativos, por la inversa del decremento logarítmico.

Con ayuda del aparato descrito se han estudiado diversas mezclas de hormigón, variando la composición de las mismas de cuatro maneras diferentes:

(1) Variando la relación agua-cemento para un contenido de cemento y una granulometría del árido constantes.

(2) Variando la cantidad de pasta de cemento para una relación agua-cemento y una granulometría del árido constantes.

(3) Variando la granulometría del árido para una relación agua-cemento y un contenido de cemento constantes.

(4) Variando la granulometría del árido para una relación agua-cemento constante y variando simultáneamente el contenido de cemento de modo que la consistencia expresada en grados VB no varíe.

Se han realizado, además, algunos ensayos aislados adicionando Darex y resina Vinsol.

Los resultados obtenidos en las medidas de deformabilidad en las distintas mezclas de hormigón se han representado por medio de curvas que dan la variación de la deformabilidad en función del tiempo de vibración. En los ejemplos estudiados en este

trabajo las medidas de la deformabilidad se han realizado durante la vibración.

Un examen detenido de las curvas obtenidas, así como la consideración de otros numerosos ensayos realizados en el Instituto Sueco de Investigaciones sobre el Cemento y el Hormigón, ponen de manifiesto que pueden distinguirse esquemáticamente tres tipos de mezclas, esto es, mezclas caracterizadas por curvas de deformabilidad decrecientes, horizontales o crecientes respectivamente (fig. 9). Una curva de deformabilidad decreciente supone que tiene lugar una segregación durante la compactación, siendo debida la disminución de la deformabilidad al hecho de que el hormigón cede el agua y el mortero que posee en exceso. En algunos casos esto da lugar a un contacto directo entre los granos del árido grueso. La segregación se puede disminuir, por ejemplo, reduciendo la relación agua-cemento, reduciendo la cantidad de pasta de cemento o recurriendo a una granulometría más fina. Una sucesión de cambios en la mezcla de hormigón conducen al caso ideal de una deformabilidad invariable durante la compactación. Este caso viene representado por una curva de deformabilidad horizontal, que puede considerarse como característica de una mezcla estable.

Si se sobrepasa un límite en las medidas tomadas para evitar la segregación, la curva de deformabilidades comienza a crecer. Si dicha curva continua creciendo incluso después de un período considerable de vibración, la mezcla correspondiente ha de ser considerada como de docilidad pobre, pues el trabajo de consolidación no es completo hasta que la deformabilidad alcanza su valor máximo.

Pero hay que tener en cuenta que la fig. 9 es una representación esquemática simplificada. De hecho, la línea de demarcación entre las mezclas de docilidad pobre y las mezclas estables no está bien definida. Por ejemplo, en varias de las mezclas estudiadas se observa que las curvas presentan un tramo creciente antes de que la deformabilidad alcance su valor máximo. Después de este período de crecimiento t_1 , la deformabilidad es prácticamente constante durante un período más o menos largo $t_2 - t_1$, y entonces vuelve a disminuir porque comienza la segregación. Por lo tanto, el hábito general de la curva de deformabilidades será del tipo de la representada en la fig. 10.

Así pues, la esencia de la anterior interpretación del hábito de la curva puede reducirse a la afirmación de que una curva de deformabilidades decreciente supone una segregación, mientras que una curva creciente indica una compactación insuficiente. Es bastante fácil demostrar que esto sucede realmente. A simple vista puede observarse la segregación en aquellos casos en que la mezcla de hormigón presenta una curva de deformabilidades marcadamente decreciente. Más aún, los ensayos ponen de manifiesto que la velocidad de caída de la deformabilidad aumenta al ser más fluido el hormigón, y, según esto, según aumenta el riesgo de segregación.

Los ensayos de resistencia realizados después de períodos variables de vibración han demostrado que la compactación no es completa mientras la curva de deformabilidades continua creciendo. Las probetas se fabricaron con la misma colada empleada en los ensayos de deformabilidad, sometiendo el mortero de cemento empleado a distintos períodos de vibración. Las figuras 11 y 12 constituyen un ejemplo espectacular de la correlación existen

te entre las curvas de resistencia y las curvas de deformabilidad obtenidas a partir de estos ensayos. Cada valor de la resistencia es la media de 3 a 5 determinaciones individuales. Desde luego, hay casos en que la correlación no es tan marcada, y en un caso es totalmente inexistente, pero, como regla general, el período de crecimiento de la curva de deformabilidad es idéntico al tiempo mínimo permisible de vibración, determinado por consideraciones de la resistencia. Por tanto, puede considerarse confirmada la anterior interpretación de las curvas de deformabilidad.

Evidentemente, al poner en obra un hormigón de alta calidad, sobre todo en estructuras expuestas a la acción de los agentes atmosféricos, es aconsejable evitar un hormigón que presente segregación, esto es, que posea una curva de deformabilidad descendente. El hecho de que la mezcla tiende a segregar agua durante la compactación demuestra que dicho agua está insuficientemente fijada en el hormigón, y esto perjudica la resistencia a la acción de la helada y algunas otras propiedades. Además, la segregación da lugar a la formación de puntos débiles en el hormigón, que fácilmente pueden ser dañados por la acción de la helada. Un ejemplo típico es la capa de mortero que con frecuencia se separa sobre la superficie de los pavimentos de hormigón y que puede dar lugar a la formación de desconchados.

Así pues, es evidente que no deben emplearse mezclas de hormigón caracterizadas por una curva de deformabilidad decreciente. Tampoco son apropiadas aquellas mezclas que presentan curvas de deformabilidad que crecen muy lentamente, porque su docilidad es pobre. En consecuencia, su consolidación total puede resultar imposible, y pueden formarse agujeros y cavidades en el

seno del hormigón endurecido. Evidentemente, lo ideal es la mezcla estable que posee la deformabilidad máxima posible sin que se produzcan fenómenos de segregación.

De acuerdo con las anteriores consideraciones referentes al peligro de emplear hormigones que pueden ser afectados por fenómenos de segregación, resulta que los aditivos de diversos tipos, como el Darex, la resina Vinsol, etc., presentan una doble ventaja. En primer lugar, y sobre este particular existe una evidencia unánime, estos aditivos mejoran en conjunto la resistencia del hormigón a la acción de la helada. En segundo lugar, producen un efecto estabilizante, que reduce el riesgo de formación de zonas débiles.

Una de las dificultades que se encuentran en la dosificación práctica de hormigones con vistas a la obtención de mezclas estables, se debe al hecho de que el concepto de estabilidad no es absoluto, sino solamente relativo. La curva general de deformabilidad de la fig. 10 presenta carácter descendente al cabo de un cierto período t_2 , y probablemente es imposible proyectar una mezcla de hormigón tal que quede asegurada una deformabilidad constante durante un tiempo de vibración ilimitado. Las medidas de la deformabilidad deben realizarse por medio de un vibrador de potencia relativamente baja, de forma que puedan efectuarse a lo largo de todas las fases del proceso de consolidación. Así, el proceso de vibración en los ensayos de laboratorio tarda varios minutos, mientras que el tiempo correspondiente en la obra, donde los vibradores son más potentes, ha de medirse en el espacio de segundos. Puede afirmarse con seguridad que el período t_2 disminuye al aumentar la potencia del vibrador, pero se desconoce todavía la relación cuantitativa entre estas dos varia

bles. No obstante, es preciso fijar el valor del período t_2 cuando hay que dosificar hormigón en el laboratorio. Puesto que se desconoce la relación entre el período t_2 y las características del vibrador, hay que escoger dicho valor de un modo empírico. En la dosificación práctica de hormigón para pistas de aeropuertos, que se compacta por medio de potentes vibradores superficiales, se trató de mantener t_2 entre 4 y 5 minutos, valor que se había demostrado que daba lugar a resultados razonables. Desde luego, sería de desear un estudio más a fondo de esta cuestión.

La elección de t_2 resulta importante no sólo con vistas a la estabilidad del hormigón en la obra, sino también en atención a su docilidad. Generalmente, al crecer t_2 , crece también t_1 , resultando perjudicada la docilidad, desde el momento que se ha demostrado anteriormente que t_1 representa el tiempo de vibración necesario y, por lo tanto, constituye también una medida de la docilidad, al menos en tanto el nivel de la deformabilidad permanece más o menos invariable.

En la actualidad se continúan realizando amplios ensayos en el sentido de poner en claro los efectos producidos por las características de deformabilidad sobre la resistencia del hormigón a la acción de la helada. Temas que serán objeto de futuras investigaciones son, entre otros, la influencia de la amplitud y de la frecuencia del vibrador, estudios más sistemáticos sobre el efecto de los aditivos y directrices para la selección de curvas granulométricas adecuadas. Cuestiones de un tipo más práctico, referentes a la aplicación de estos métodos a la construcción en gran escala, están actualmente en estudio en la Asociación Sueca del Cemento en estrecha colaboración con el Instituto Sueco de Investigaciones sobre el Cemento y el Hormigón.

L. S. C.

- - -

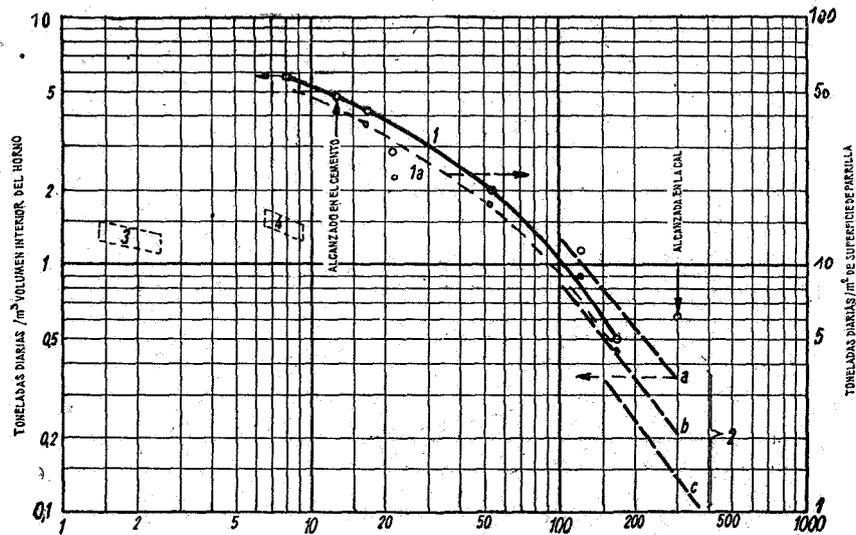


Fig. 5.—Producción específica de clinker (o cal viva) en función del tamaño de los gránulos en hornos verticales; 1, cocción del cemento, tamaño de los gránulos en mm. (grano medio), toneladas diarias/m³; 1a, cocción del cemento, tamaño de los gránulos en mm. (grano medio), toneladas diarias/m²; 2, cocción de cal, tamaño de la piedra caliza en mm. (grano máximo) toneladas diarias/m³; a, tiro fuerte; b, tiro suave; c, tiro natural; 3, cocción del cemento, cinta de sinterización, solamente en redimiento de clinker, toneladas diarias/m²; 4, material crudo, secado y parcialmente calcinado, parr.lla Lepol, toneladas diarias/m².

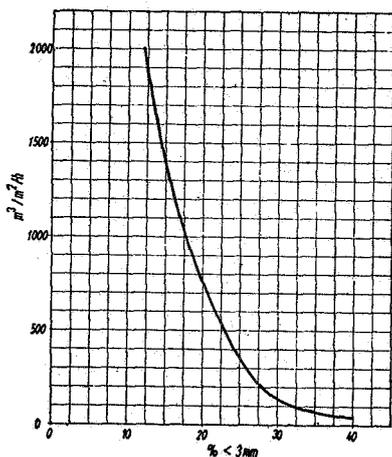


Fig. 7.—Cantidad relativa de aire que pasa a través de un lecho de gránulos para distintas fracciones finas, a presión constante.

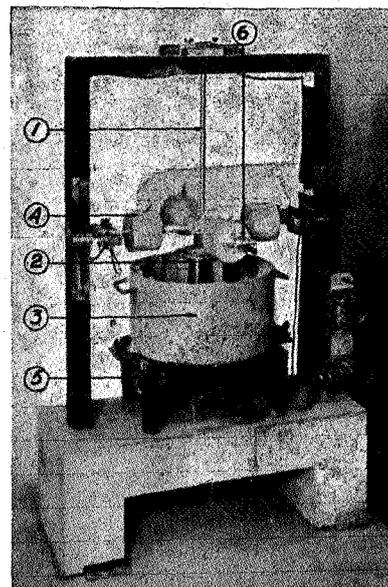


Fig. 8.—Aparato para la medida de la deformabilidad.

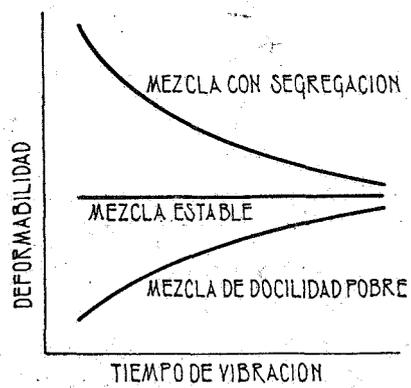


Fig. 9.—Curvas características de deformabilidad.

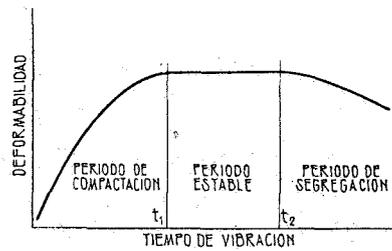


Fig. 10.—Hábito general de la curva de deformabilidad.

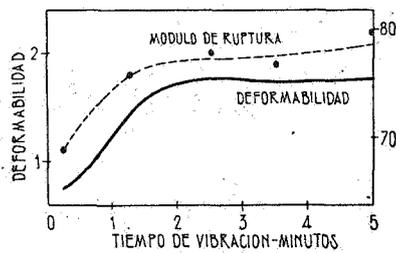


Fig. 11.—Ejemplo de correlación entre las curvas de deformabilidad y resistencia. Mortero de cemento. Relación agua/cemento, 0,35. Curado en agua, siete días. Probetas de $10 \times 15 \times 80$ cms.

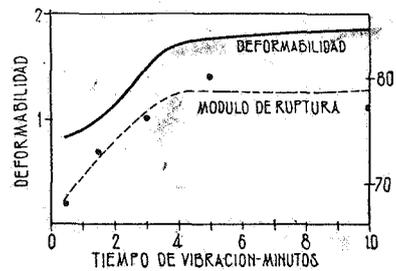


Fig. 12.—Ejemplo de correlación entre las curvas de deformabilidad y resistencia. Mortero de cemento. Relación agua/cemento, 0,35. Curado en agua, siete días. Probetas de $2 \times 5 \times 25$ cms.