

689-38

nuevos resultados y recientes estudios sobre la fluencia del hormigón

R. L' HERMITE y M. MAMILLAN

Matériaux et Construtions (RILEM), nº 7, enero-febrero 1969, págs. 35-41

RESUMEN

La memoria que presentan los autores no tiene por objeto proponer una teoría físico-química de la fluencia. Se ha presentado ya un buen número de ellas para que se pueda añadir otra con suficiente certidumbre. El deseo de los autores es simplemente aportar hechos experimentales susceptibles de ser interpretados, pues los resultados que se dan se han obtenido con todas las precauciones necesarias para garantizar la objetividad.

Debe señalarse, en primer lugar, que la fluencia se ha estudiado entre 5 y 10 años con un aumento débil pero cierto, al menos en atmósfera seca (50 % H.R.).

La edad de carga tiene una influencia clara sobre la fluencia ulterior en atmósfera seca. La fluencia a 8 años disminuye siguiendo una ley aproximativa en $A-B \log t$. Bajo agua, el efecto de la edad de carga es mucho menos importante.

Juega su papel la dimensión absoluta de las piezas de ensayo: la fluencia disminuye en magnitud y en velocidad cuando la dimensión aumenta (del orden de $1/4$ entre prismas de 7 y 20 cm de lado).

La deformación de la fluencia bajo carga no va acompañada de una pérdida de agua medible superior a la que acompaña la retracción sin carga.

La variación de humedad del medio de conservación entre dos valores a y b (100 y 50 % H.R.) da una fluencia media ligeramente inferior a la media de las fluencias bajo las higrometrías a y b.

Es probable (aunque no está probado) que las deformaciones de la fluencia en compresión responden al principio de superposición de fuerzas, cuando éstas son inferiores al tercio de la carga de rotura.

En los límites de dosificación de cemento de 250 a 400 kg/m³, la amplitud de la fluencia disminuye cuando esta dosificación aumenta.

La figura 1, en coordenadas logarítmicas, muestra que entre 6 y 10 años el aumento de fluencia es inferior al 1,5 % por año de la deformación total, para una conservación a 50 % de humedad relativa, después de cargar las probetas a los 7 días. Esto es en el límite de la precisión de las medidas. Sin embargo, no es todavía posible saber si el fenómeno tiende hacia una estabilización.

La figura 2 muestra la evolución de la fluencia en las mismas condiciones, salvo el medio de conservación (en agua); los tipos de aumento anual después de 10 años, más débiles en valor absoluto, permanecen del mismo orden y probablemente inferiores; no son prácticamente medibles.

Un hecho importante que se ha examinado es la influencia de la edad de carga (7 días, 28 días, 730 días) sobre la fluencia después de 8 años de confeccionado el hormigón (figura 3). Se comprueba que para la conservación en agua, la fluencia a esta edad varía poco cuando la carga se efectúa después de 28 días; disminuye muy ligeramente. Por el contrario, disminuye muy fuertemente para la conservación en aire seco (50 % H.R.). En estas condiciones sigue más o menos una ley logarítmica $\Delta = A - B \log t$. La fluencia considerada es la deformación total desde el instante de la carga, sin deducir la retracción durante el mismo período. Es posible, por otra parte, que las dos curvas acaben por encontrarse.

¿Es necesario ver aquí una influencia de la hidratación del cemento, cuya velocidad es más rápida en agua que en aire seco? A este efecto se han medido las resistencias a compresión en cada una de las edades de carga indicadas (fig. 4), suponiendo que ellas permitirían conocer el estado de hidratación en el momento dado.

En aire seco, los aumentos de resistencia se detienen a 90 días o incluso antes; en agua, continúan aumentando hasta 180 días, por lo menos. Para la fluencia, es el fenómeno inverso el que se produce; su amplitud no cesa de disminuir en aire, pero en agua permanece estable por encima de 90 días. No hay pues una relación entre la resistencia a una edad dada y la fluencia concomitante. Se trata, pues, de otro fenómeno que los autores no han podido explicar.

No se encuentra otra explicación que la variación del módulo elástico. ¿No se tratará de estructuras de cristalización diferentes de la fase conglomerante más frágil, cuando se hace en seco en vez de en agua? En tal caso la cuestión está planteada y exige ser resuelta.

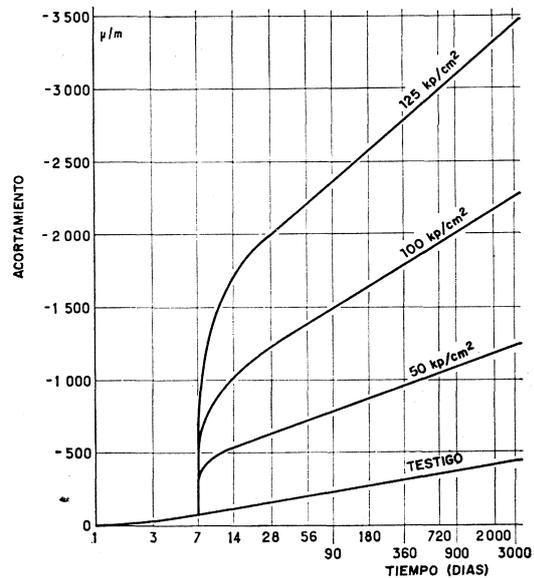


Fig. 1.—Edad de carga: 7 días.
Conservación: 50 % H.R.

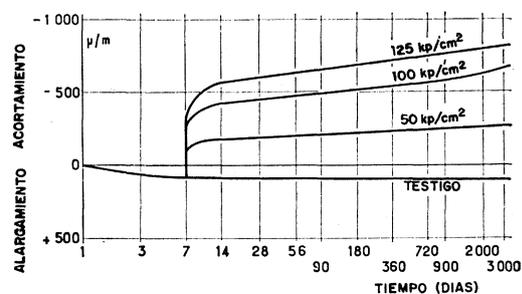


Fig. 2.—Edad de carga: 7 días.
Conservación: en agua.

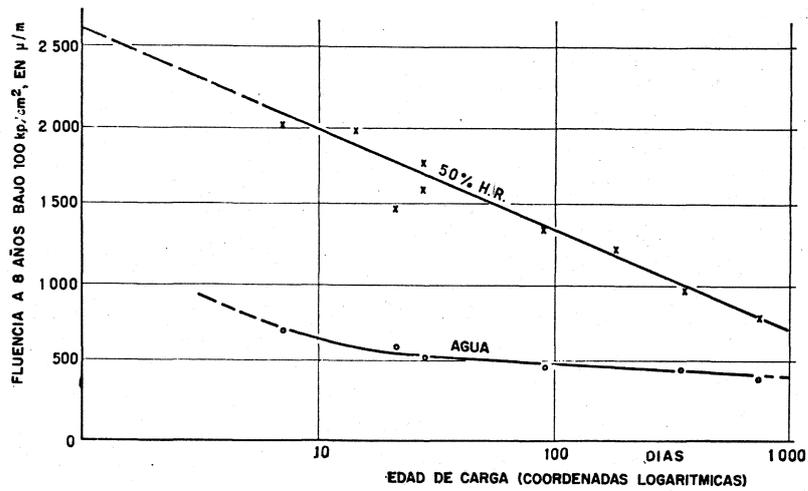


Fig. 3.—Fluencia a 8 años de edad en función de la edad de carga.

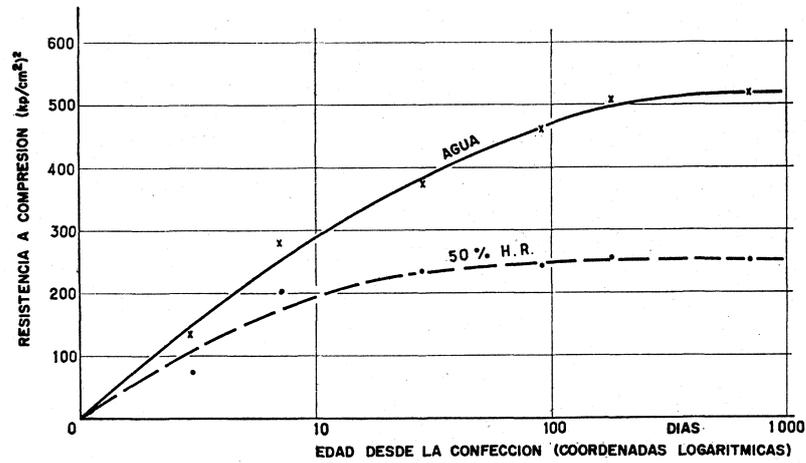


Fig. 4.—Variación de la resistencia a la compresión con la edad.

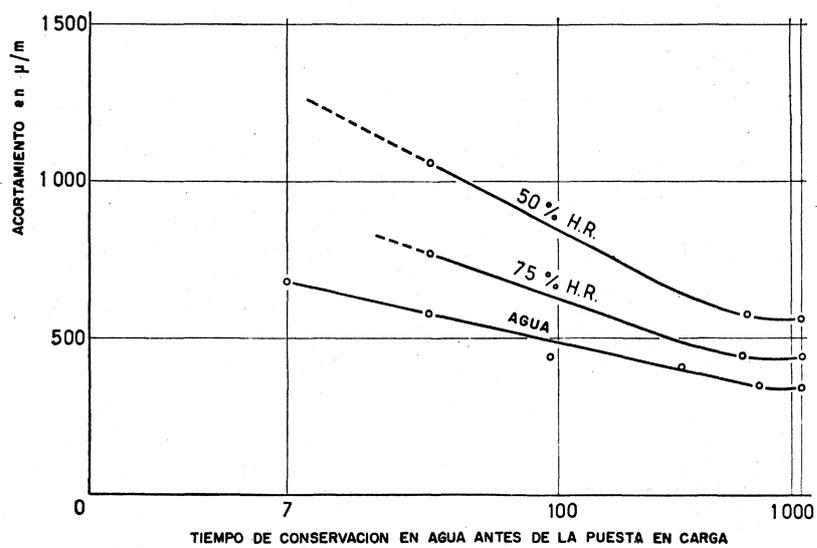


Fig. 5.—Deformación total después de 1.000 días de carga bajo 100 kp/cm².

Otra cuestión es la que concierne a la influencia de la dimensión absoluta de las probetas, prisma o cilindro, sobre la magnitud de la fluencia. En nuestro raport presentado en Madrid (1) hemos demostrado que la magnitud absoluta de las dimensiones interviene de manera muy clara sobre la retracción libre entre prismas de 7 cm y 100 cm de lado, a igualdad de otras circunstancias.

Los medios experimentales no han permitido realizar ensayos análogos sobre prismas cargados en escala comparable. Pensamos hacerlo, sin embargo, pronto, pero esperando algunas cifras obtenidas después de un año y medio de carga. De esta manera, se obtienen, para prismas de lado d , las siguientes variaciones en aire seco (50 % H.R.):

d	7 cm	14 cm	20 cm
Fluencia en μ/m	750	680	600

Hay pues una diferencia de 1/4 entre la fluencia para la más pequeña y la mayor dimensión. Saber la razón de este hecho es otra cuestión. ¿Es una cuestión de evaporación de agua como ocurre con la retracción en que los cuerpos masivos son más lentos de evaporar? Veremos más adelante que en escala macroscópica la fluencia no parece estar unida a una pérdida de agua. En todo caso, para una conservación en agua, la fluencia es independiente de la dimensión. Pensamos que el origen de este factor dimensional está en el hecho de que la pérdida de agua media en aire no saturado tiene lugar a una velocidad tanto más pequeña cuanto más masiva sea la pieza.

Se sabe, en efecto, que la fluencia disminuye cuando el hormigón está más húmedo y se hace finalmente tanto más pequeña cuanto más lenta se hace la desecación (la figura 5 demuestra que la fluencia disminuye cuando el tiempo de conservación en agua aumenta).

Un fenómeno análogo juega para la retracción (1), pero esto no quiere decir que exista una relación funcional entre la retracción y la fluencia. Solamente puede existir una correlación debida a causas comunes.

Se encuentran en curso una serie de experiencias para medir el contenido en agua del hormigón a diferentes distancias de la superficie, así como la pérdida media de agua en el tiempo y todo ello para diferentes dimensiones (hasta $70 \times 70 \times 240$ cm). Estos ensayos permitirán, es de esperar, comprobar la interpretación de los autores.

Varios autores, asimilando la fluencia a una retracción ampliada bajo carga, imaginan que, por analogía con el fenómeno de retracción, la deformación plástica lenta en compresión va acompañada de una pérdida de agua suplementaria.

Los autores han querido verificar cuidadosamente esta hipótesis y con este fin se han confeccionado prismas de 7 cm de lado, lo más idénticos posible en su composición. Los unos se han cargado con 100 kp/cm^2 y los otros conservados en las mismas condiciones sin carga alguna (dos en cada caso). Una primera serie se ha conservado 7 días en agua y después la mitad se ha puesto en carga.

En la figura 6 se ve que las diferencias de pérdida de peso son extremadamente pequeñas (del orden del 2 %).

En la figura 7, cargando a 14 días, se comprueba que las probetas sin carga dan pérdidas de peso encuadradas dentro de las probetas cargadas.

Bajo agua (fig. 8) los aumentos de peso se confunden más o menos, con diferencias del mismo orden que para la conservación en seco.

No parece pues que en escala macroscópica pueda ponerse como causa una mayor exudación de humedad bajo carga, a menos que sea extremadamente débil y no medible (los autores se limitan aquí a los resultados de tres grupos de experiencias realizadas a título de ejemplo, cuyos resultados se han confirmado plenamente por otros varios ensayos también probatorios).

El hormigón no parece pues una esponja que pierde su agua cuando se le prensa.

Ciertos resultados de medidas en obra nos habían podido hacer suponer que la fluencia en condiciones de humedad variables podía ser superior a la fluencia bajo higrometría relativa constante. Para verificar esta hipótesis se han realizado una serie de experiencias haciendo variar la higrometría del medio de forma alternada entre una humedad relativa de 50 % y la saturación.

Estos ensayos por el momento han durado unos 1.000 días y los resultados se muestran en la figura 9.

Se han elegido dos condiciones de carga: sin carga, lo que da la retracción y el entumecimiento, y bajo una carga de 100 kp/cm² (se trata de probetas de 7 cm de lado que parecen llegar a adquirir una humedad más o menos constante sobre todo el volumen en los intervalos de tiempo admitidos).

El campo B muestra la amplitud de la deformación sin carga para alternancias de 7 días entre la saturación en agua y la atmósfera de 50 % de H.R. Se ve que la media con-

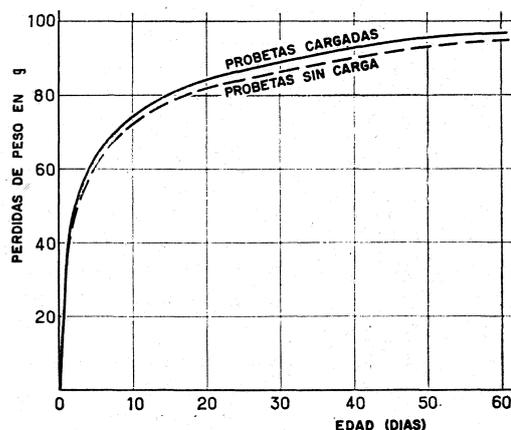


Fig. 6.—Evolución de las pérdidas de peso. Conservación inicial: 7 días en agua. Conservación definitiva: 50 % H.R. Edad de carga: 7 días.

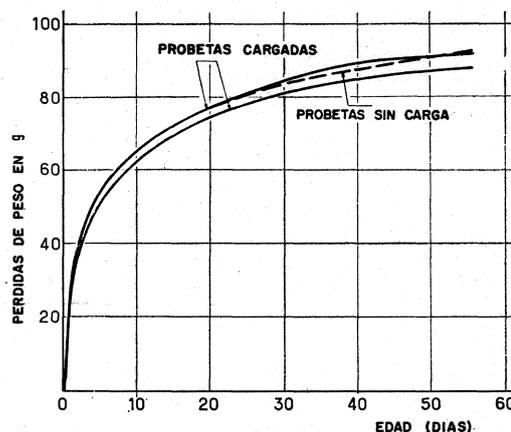


Fig. 7.—Evolución de las pérdidas de peso. Edad de carga: 14 días. Conservación inicial: 14 días en agua. Conservación definitiva: 50 % H.R.

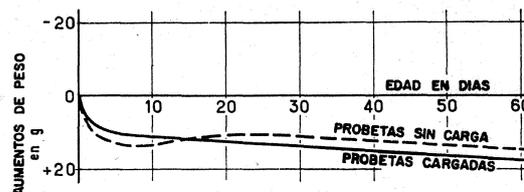


Fig. 8.—Evolución de los aumentos de peso. Conservación constante en agua.

duce a un valor nulo o casi nulo y que la amplitud gira alrededor de $\pm 50 \mu/m$. Hay pues una compensación entre el hinchamiento y la retracción.

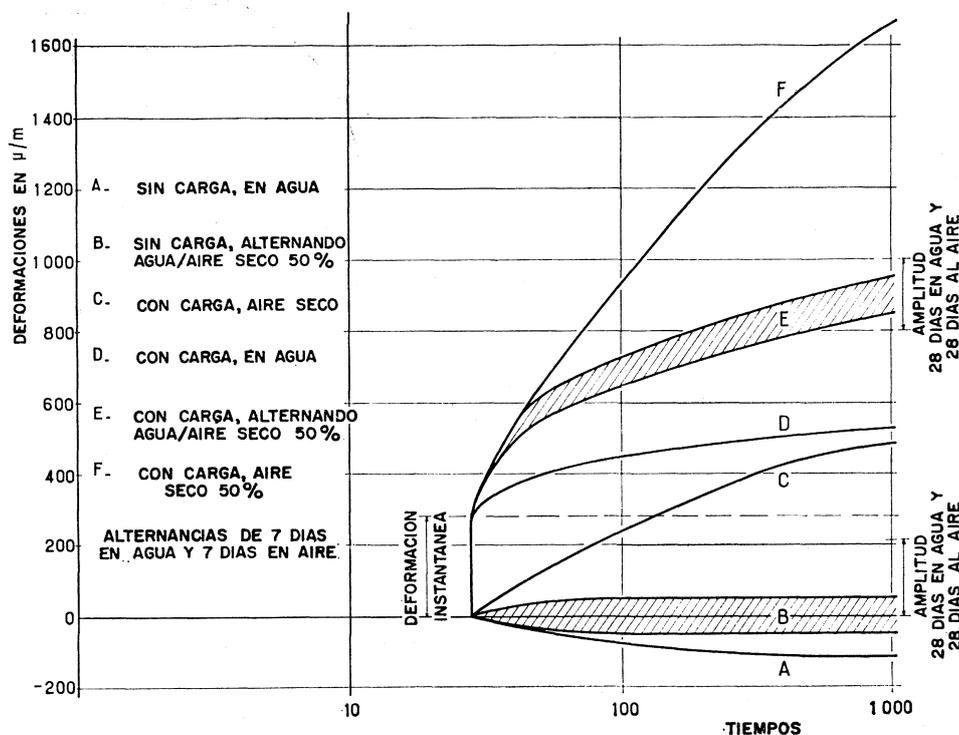


Fig. 9.—Fluencias bajo conservación constante y fluencias bajo conservación alternada entre las conservaciones en agua y en aire seco (50 % H.R.) bajo una carga de 100 kp/cm².

Bajo una carga de 100 kp/cm², la amplitud es del mismo orden y la media alcanza 700 μ/m , deduciendo de ella la deformación instantánea de 600 μ/m .

Por conservación permanente en agua se obtiene a los 1.000 días, hecha la deducción de la deformación instantánea, 200 μ/m y en aire seco de 50 % de H.R., 1.360 μ/m . La media entre la fluencia en el agua y la fluencia en el aire sería así de 750 μ/m . Por lo tanto, la fluencia media en conservación alternada es inferior a la media de la fluencia en agua y en aire.

Si se consideran los valores máximos de la fluencia bajo conservación alternada, se encuentra para estos 940 μ/m menos 300 μ/m = 640 μ/m , valor todavía inferior a la media. Se puede pues deducir para el caso presente que la alternancia en la conservación no tiene por efecto aumentar las deformaciones de fluencia.

En otra serie de experiencias, las alternancias han sido de 28 días en agua y 28 días en aire (los resultados a 1.000 días se encuentran en la columna de la derecha de la fig. 9). Sin carga, la amplitud de la fluencia ha sido de 200 μ/m , superior a la precedente. La media se sitúa en + 100 μ/m , es decir, hay una retracción media efectiva. Se vuelve a encontrar la misma amplitud bajo una carga de 100 kp/cm², pero la fluencia media es la misma, es decir, 600 μ/m , dentro de la precisión de las medidas.

Se admite habitualmente que la fluencia puede considerarse en último término como una función lineal de la deformación a compresión entre un valor inferior que corresponde a la retracción y un valor superior al menos igual a la tercera parte de la carga de rotura.

Esta concepción permite asimilar los cálculos de deformación plástica a los del cálculo elástico, empleando un coeficiente de deformación diferente, más pequeño que el coeficiente de elasticidad. Para una asimilación completa será necesario que se pueda verificar que existe superposición de efectos de fuerzas. En otros términos, si una pieza está cargada bajo un tipo de trabajo T_0 , desde una edad a_0 hasta una edad a_1 , y a esta edad se aplica una carga $T_2 = T_0 + T_1$, la fluencia consecutiva, hecha la deducción de las deformaciones instantáneas, deberá ser la suma de la fluencia continua bajo la carga T_0 aplicada en el tiempo a_0 más la fluencia complementaria debida a la carga T_1 aplicada a la edad a_1 , sin carga previa (fig. 10). Los autores han emprendido algunas experiencias para confirmar esta hipótesis, pero parece prematuro deducir una confirmación.

Sin embargo, y de forma ocasional, nos ha sido posible hacer la verificación inversa. Estando cargada una probeta en el valor T_0 y remitida en el tiempo a_1 (8 días) a un valor inferior $T_0 - T_1 = T_2$ (fig. 11), hemos verificado la evolución de la fluencia bajo este valor; se encuentra que durante una descarga de 8 días entre 78 y 40 kp/cm² el intervalo a entre las curvas consecutivas de fluencia A y B permanece constante, con la precisión de las medidas realizadas hasta 150 días, fecha de las últimas medidas. De lo que se deduce que la superposición de los efectos de fuerzas tiene una gran probabilidad de tener lugar para la fluencia en el dominio de cargas anteriormente considerado.

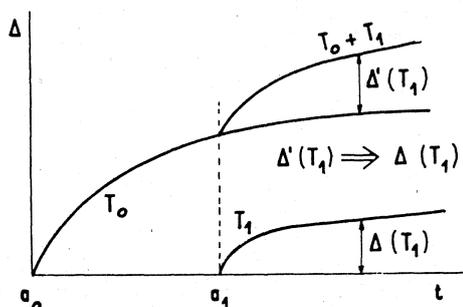


Fig. 10.—Hipótesis sobre la superposición de los efectos de la fluencia.

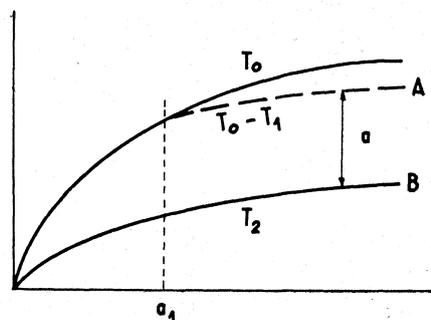


Fig. 11

Un último punto que parece tener importancia es la influencia de la dosificación de cemento sobre la fluencia. Se han efectuado un importante número de ensayos sobre hormigones de granulometría constante con relación A/C = 0,5 y en pasta pura. Las probetas se han conservado permanentemente en agua a 20°C y cargadas a los 28 días, o conservado 7 días en agua, colocado después al aire a 50 % H.R. y 20°C y cargadas, final-

mente, a los 28 días. Los esfuerzos aplicados han sido de 50, 100 y 125 kp/cm². Las resistencias a la tracción y compresión a 28 días después de 21 días de conservación al aire (50 % H.R.), se dan en la siguiente tabla:

Tensión de rotura Dosificación	Compresión vertical	Tracción directa	Tracción por flexión	Compresión sobre extremos de prisma
250 kg/m ³	240	23,5	55,6	256
350 kg/m ³	287 (agua)	28,1	60,1	359
	248 (50 %)			
450 kg/m ³	260	23,1	56,7	374
Pasta pura	498	110	—	569

Las figuras 12 y 13 dan, a título de ejemplo, las curvas de deformación para un hormigón de 250 kg/m³, conservado en agua o en aire seco.

Las figuras 14 y 15 muestran la influencia de la dosificación sobre la deformación de fluencia por los dos tipos de conservación indicados, bajo un esfuerzo a compresión de 125 kp/cm².

La figura 16 representa la fluencia después de 2 años en las dos condiciones de conservación, en función de la dosificación. Se observa que el aumento en el contenido de cemento hace disminuir ligeramente la deformación plástica lenta; por el contrario, el ensayo en pasta pura acusa una fluencia más elevada. Debe pues existir una dosificación de fluencia mínima que parece poder situarse en los alrededores de 500 kg/m³ para el tipo de árido empleado en este estudio.

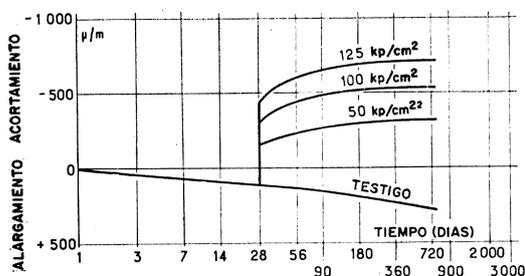


Fig. 12.—Influencia de la tensión de carga.
Edad de carga: 28 días.
Composición: 250 kg/m³.
Conservación: en agua.

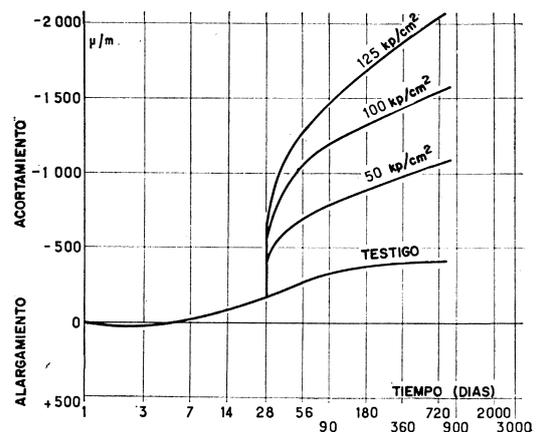


Fig. 13.—Influencia de la tensión de carga.
Edad de carga: 28 días.
Composición: 250 kg/m³.
Conservación inicial: 7 días en agua.
Conservación definitiva: 50 % H.R.

Fig. 14.—Comparación de las deformaciones locales.
Influencia de la dosificación de cemento.
Edad de carga: 28 días.
Conservación: en agua.
Tensión: 125 kp/cm².

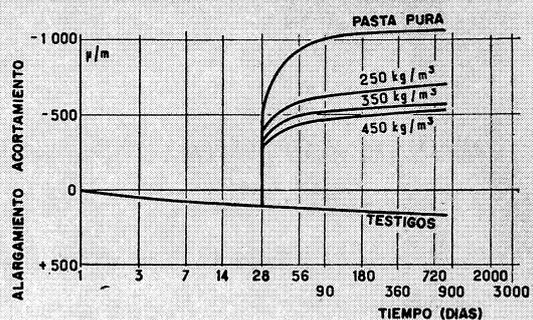


Fig. 15.—Comparación de las deformaciones totales.
Influencia de la dosificación de cemento.
Edad de carga: 28 días.
Tensión: 125 kp/cm².
Conservación inicial: 7 días en agua.
Conservación definitiva: 50 % H.R.

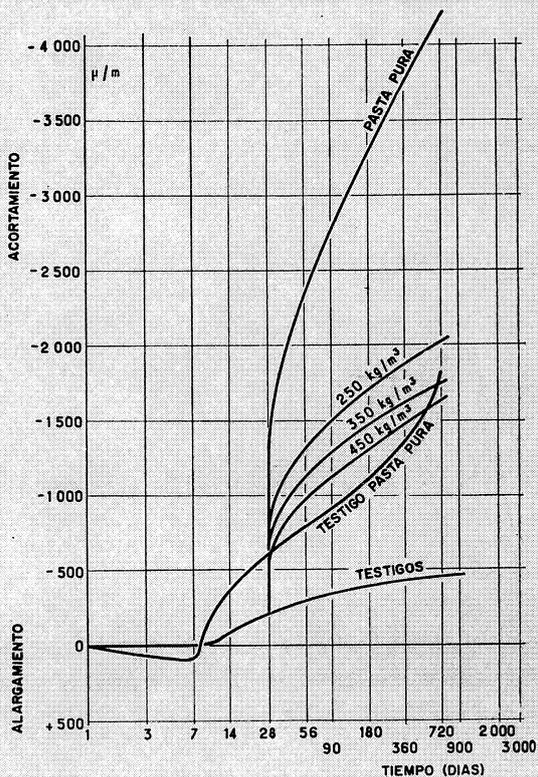


Fig. 16.—Fluencia a 2 años bajo 125 kp/cm² en aire seco y en agua en función de la dosificación.

