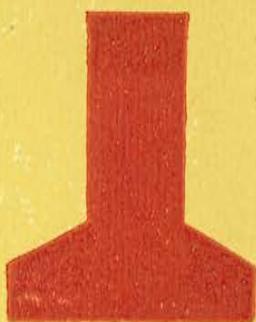
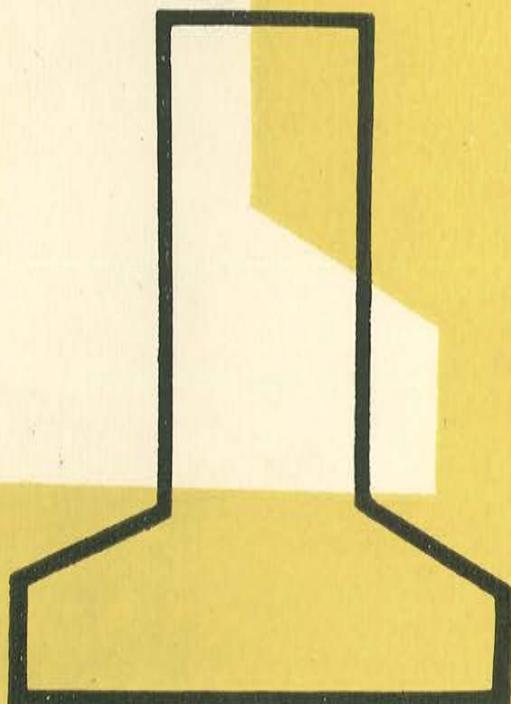


ULTIMAS NOTICIAS SOBRE

hormigón pretensado



BOLETIN NUM. 36 DE LA ASOCIACION ESPAÑOLA DEL HORMIGON PRETENSADO
DEL INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

Q

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
Patronato "Juan de la Cierva" de Investigación Técnica



ULTIMAS NOTICIAS

Técnicas en Estructuras

Hormigón Protensado

Boletín de circulación limitada

Nº 36

Enero-Febrero 1957

- INSTITUTO TÉCNICO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL CEMENTO -

I N D I C E

Pág.



837-6-1 Efectos de la helada en los morteros de inyección: A. Röhnisch ...

1

- - -

N o t a: El Instituto, una de cuyas finalidades es divulgar los trabajos de investigación sobre la construcción y edificación, no se hace responsable del contenido de ningún artículo, y el hecho de que patrocine su difusión no implica, en modo alguno, conformidad con la tesis expuesta.

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

837-6-1 EFECTOS DE LA HELADA EN LOS MORTEROS DE INYECCION

por A. Röhnisch

La razón del ensayo

A principios de 1951 se estudiaron las grietas longitudinales que aparecieron en las péndolas pretensadas de un puente en arco. Las solicitudes estáticas y dinámicas fueron objeto de comprobación por medio de ensayos de cargas a escala normal, de los que se llegó a la conclusión que ni las tensiones de tipo estático ni las de carácter dinámico fueron la causa de las grietas. Poco tiempo después de haber inyectado los conductos para los cables con mortero, apareció la helada. A las 12 horas, la temperatura descendió hasta $-1,5^{\circ}\text{C}$; 8 días después llegó a -3°C y a los 21 días a -6°C ; lo que hizo suponer que las grietas aparecieron debido a la helada. Con objeto de poder asegurar claramente si el mortero inyectado, una vez expuesto a la helada, es capaz de romper el hormigón que le rodea, debido al aumento de volumen por congelación y cristalización del agua de amasado no combinada, en el verano de 1951 se realizaron ensayos de congelación utilizando probetas de hormigón pretensado, de un metro de longitud, y de sección transversal aproximadamente igual a la correspondiente a las péndolas del puente.

Debido a que las instalaciones del laboratorio de ensayo de la Jefatura de canales y navegación fluvial de Munich tuvieron que ser trasladadas a otras dependencias, no fué posible efectuar un ensayo conjunto de las cuatro probetas provistas. Aunque aparecieron grietas similares a las de la estructura en el ensayo de las dos primeras probetas de 60 días de edad respecto al hormigonado, y ensayadas inmediatamente después de haber inyectado (figs. 1 y 2), en las dos últimas

probetas ensayadas, de 110 días de edad con relación al hormigonado, probadas inmediatamente después de inyectar, no aparecieron dichas grietas, porque, probablemente, el hormigón que rodeaba al mortero adquirió, mientras tanto, suficiente resistencia a tracción para resistir la presión provocada por el hielo. Los resultados de este primer ensayo no fueron bastante conclusivos para asegurar la aserción de que las grietas obedecían a los estragos causados por la helada.

En el otoño de 1953 se detectaron grietas que se extendieron paralelamente a los conductos de los cables en un puente de hormigón pretensado, de varios tramos y de vigas simplemente apoyadas; grietas que no podían ser causadas por tensiones estáticas y dinámicas. En este caso particular, la helada apareció poco después de haber inyectado el mortero en los conductos. A las 12 horas de haber inyectado algunos tramos, la temperatura descendió a -2°C , y a -4°C a los tres días de haber inyectado otros tramos. En otro tramo, la temperatura descendió a -4°C a los tres días de haber inyectado, continuando así hasta el séptimo día en el que descendió a -15°C . Sin embargo, en este caso, es dudoso asegurar que las temperaturas en la vecindad de los conductos hayan descendido por debajo de cero, ya que las vainas se tuvieron que inyectar a los 15 días de haber hormigonado, debido a razones que corresponden a la ejecución de la obra. Unas tres semanas después apareció una helada severa y continua.

Este tipo de desperfectos causados a una estructura concierto a una investigación sistemática de las causas, principalmente, debido a las autoridades interesadas, que mantenían opiniones divergentes sobre el fenómeno. Por otra parte, se creyó que los desperfectos causados podían tener su origen en la presión empleada para la inyección del mortero, ya que la resistencia del hormigón en la superficie era muy baja en este momento. Esto no obstante, el autor es de la opinión de q

las grietas se deben exclusivamente a la helada, y retiene la idea, muy particularmente, de la posibilidad de la existencia de una segregación en el mortero, así como la formación de bolsas de agua o de hielo en presencia de la helada.

Los ensayos se encaminaron en un principio para determinar si, en efecto, se trataba de la presencia de una segregación -y en cu-
yo caso en qué cuantía- o simplemente de una separación de agua o exu-
dación de los morteros empleados en la inyección de los conductos de
los cables en el hormigón pretensado hasta 1954. Además, las observa-
ciones locales mostraron la necesidad de investigar la influencia de la
temperatura en el tiempo de fraguado del mortero. Particularmente, se
creyó necesario determinar por medio de series de ensayos sistemáticos el
efecto de la helada en el mortero respecto a su composición y edad.

Como la intención de los ensayos era la de asegurar las causas de las grietas en los puentes de hormigón pretensado de un solo tramo, el primer programa de ensayos -que se terminó a finales del año 1954- se basaba en las condiciones locales y temperaturas que prevalecían durante la construcción de estos puentes.

Las investigaciones perseguidas en el primer programa de ensayos comprendían las siguientes:

- a) - Segregación en el mortero.
- b) - Influencia de la temperatura en el tiempo de fraguado.
- c) - Efecto de la helada.

En cada uno de los casos, las dosificaciones indicadas en la columna 2 del Cuadro 2, con relación agua-cemento (A/C) dada en la columna 3, fueron objeto de una investigación. Los cementos aluminosilicatos (TSZ) se han subdividido de acuerdo con las temperaturas del ensayo. En los casos que el mortero tenía una relación agua-cemento de 0,50, su di-

cilidad resultó ser impracticable, por lo que se aumentó la referida relación a 0,525 ó 0,55.

Las notaciones empleadas son las siguientes:

- V_n = Volumen de la muestra de mortero fresco.
 V_{set} = Volumen del mortero solidificado.
 V_a = Volumen de aire y agua separados ($V_a = V_n - V_{set}$)
 V_t = Volumen de la probeta completamente seca, poros excluidos ($V_t = G_t/s$)
 V_p = Volumen de los poros en el mortero solidificado ($V_p = V_{set} - V_t$)
 V_{wa} = Volumen del agua separada ($V_{wa} = V_{wu} - V_p$)
 V_{wu} = Volumen del agua químicamente no combinada-agua libre separada y agua en los poros ($V_{wu} = G_n - G_t$)
 V_o = Volumen del mortero solidificado y agua separada ($V_o = V_{set} + V_{wa}$)
 V_1 = Volumen de los poros llenos de aire en el mortero solidificado con poros sin agua ($V_1 = V_p - V_{wu}$)
S = Peso específico de la muestra completamente seca.
 G_n = Peso de la muestra fresca.
 G_t = Peso de la muestra completamente seca.
 L = Volumen de aire con relación a V_o .
 W = Volumen de agua con relación a V_o .
 f_B = Relación entre el volumen de poros libres de agua y el del agua químicamente no combinada.

Los morteros han sido amasados manualmente. Las relaciones de agua-cemento adoptadas corresponden a las que actualmente se emplean en las obras.

2.- Resultados del primer programa de ensayos

2.1 La segregación en el mortero de relleno de conductos de los cables del hormigón pretensado después de haber sido inyectado.

2.11 Ensayo preliminar.— Antes de amasar los morteros, todos los materiales constituyentes, así como el material del equipo auxiliar necesario, se enfrió a la temperatura de 3°C. Pequeños tubos de cristal, de 60 cm de longitud, de 10 mm de diámetro interior, se llenaron con diferentes clases de morteros. Las extremidades de los tubos se cerraron con tapones de corcho y se sellaron con una mezcla de parafina y cellofona. Estos tubos se colocaron en posición vertical y a una temperatura de 3°C durante los ensayos.

En casi todos los casos se observó una precipitación de sólidos, mientras que el agua se recogía en la parte superior del tubo (fig. 3). En los morteros de cemento Portland PZ 325 se produjo una expulsión en varios puntos, causando una grieta en cada uno de estos puntos de la columna de mortero. Debido al asiento subsecuente de los materiales sólidos, estas grietas se llenaban con el agua que ascendía en el interior de los tubos. En las probetas con relación agua-cemento de 0,5 ó 0,525, este proceso se desarrolló muy lentamente, y llegó hasta pararse completamente, como lo han demostrado los ensayos realizados similarmente con tubos de cristal de mayor longitud. En estos casos, el mortero se solidificaba en trozos de 20 a 30 cm, separados por grietas llenas de agua.

En los ensayos cuyas probetas se almacenaron en posición

horizontal, también se pudo observar la presencia de la segregación del agua. El agua separada del mortero se recogía en la parte superior del tubo (fig. 4).

La precipitación del material tuvo lugar, principalmente, durante las dos horas después de haber amasado el mortero. Respecto a los morteros con cemento aluminoso (TSZ) R, la duración del proceso de precipitaciones se determinó, separadamente, a las temperaturas de 3, 20 y 30° C. Para una relación de agua-cemento de 1,00, se observaron los tiempos siguientes:

Temperatura (° C)	Duración de la precipitación (min)
3°	205
20°	60
30°	10

Los resultados, por sí mismos, ya indican que las temperaturas tienen cierta influencia sobre la constitución del mortero.

La determinación métrica de la relación volumétrica entre el volumen de las cavidades libres de mortero y el volumen total de las probetas se ha indicado en el Cuadro 1.

Por tanto, se infiere que, los morteros empleados hasta la actualidad, no garantizan la completa combinación. Sin embargo, ya se había llegado a la conclusión, en los primeros ensayos de congelación que las cantidades de agua segregada o separada no eran de decisiva importancia respecto a la resistencia contra la helada, pues siempre se formaba una capa de aire sobre el agua (fig. 5), espacio que servía de compensación para el aumento de volumen de la cristalización del agua en hielo. Por consiguiente, los tubos de cristal no se rompián en la

proximidad de la capa de agua, sino que por el contrario, con harta sorpresa, solamente en las partes ocupadas por el mortero.

2.12 Ensayo principal. - Por esta razón se intentó, simultáneamente, la determinación del volumen de poros de la masa de mortero, a fin de lograr la información necesaria. No obstante, fué imposible medir el volumen de poros de las probetas contenidas en los tubos, con el grado de precisión que se exigía; por ello, se determinó independientemente, y por comparación, llenando unos anillos de vulcanita con los morteros ensayados; pero, recubriendo superior e inferiormente, con placas de cristal que se sellaban convenientemente. Para mayor sencillez, esta operación se conducía a una temperatura de 20°C (al operar con cemento aluminoso, las temperaturas eran de 3 y 30°C). Después de fraguado el mortero se pudo medir, con gran precisión, el volumen reducido (V_{set}). El grado de separación, expresado con un porcentaje del volumen inicial, es:

$$\frac{V_a}{V_n} \cdot 100 = \frac{V_n - V_{set}}{V_n} \cdot 100$$

El volumen de poros V_p en el mortero solidificado se obtiene con el peso específico s , el peso de la probeta completamente seca G_t y el volumen de la probeta seca $V_t = G_t/s$:

$$V_p = V_{set} - V_t$$

Los resultados se hallan en el Cuadro 2 columna 11 y en la figura 6.

Esto permitirá lograr un cierto número de distinciones de

los diferentes morteros. Los morteros con la menor relación agua-cemento, naturalmente, darán los menores volúmenes de poros, en el orden siguiente: cemento aluminoso, cemento Portland PZ 425, cemento Portland PZ 325 y cemento Portland PZ 425 con 0,2 por ciento de agente aireante A. Los cementos aluminosos L muestran valores más particularmente favorables para el volumen de poros; con este cemento, el volumen de poros para una relación agua-cemento de 1,00 no es sensiblemente mayor al de un cemento Portland con una relación agua-cemento de 0,525 ó 0,55. Se ha de tener en cuenta, sin embargo, que el cemento aluminoso L da, con frecuencia, la mayor proporción de agua separada.

Para aclarar el problema en su conjunto, se consideró apropiado tener en cuenta el volumen de agua separada (V_{wa}) al determinar el volumen de poros (V_p), así como mostrar la proporción de agua separada de cada mortero individualmente (fig. 7), obteniendo los datos derivados de los que se indican en las columnas del 12 al 15 del Cuadro 2. A este respecto, ha de hacerse notar que el agua sólo se separa si $V_p < V_{wa}$. En los otros casos, el agua químicamente no combinada se halla en los poros del mortero solidificado. El volumen de poros, como porcentaje de V_0 , se ha indicado en la columna 15. Con excepción de una relación agua-cemento de 0,75, estos datos comparativos indican que los volúmenes de poros de los cementos aluminosos R y L son aproximadamente iguales. Para una relación agua-cemento de 0,75, la media del volumen de poros en un cemento aluminoso L es aproximadamente del 42 por ciento y alrededor de un 3 por ciento menor que el correspondiente al cemento aluminoso R. Contrariamente a esto, el volumen de poros de un cemento Portland con una relación agua-cemento de 0,50 y 1,00 es de 1 a 6 por ciento; y para una relación agua-cemento de 0,75 son un 10 y 1 por ciento mayores que los volúmenes medios de poros correspondientes a los cementos aluminosos R y L, respectivamente. Como era de esperar

el cemento Portland PZ 425 con el 0,2 por ciento de agente aircante A es el que dió mayor volumen de poros (fig. 8).

A parte de la determinación general del agua segregada, se realizó, simultáneamente, un análisis químico del cemento Portland PZ 325 con polvo de cuarzo mezclado en la proporción 2 : 1, para los tres valores de 0,525, 0,75 y 1,00 de la relación agua-cemento, con objeto de averiguar si, debido a la diferencia de los pesos específicos de los distintos constituyentes del mortero, los materiales sólidos no se separaban. Las probetas empleadas a este objeto se las dejó fraguar en tubos de 60 cm de longitud colocados en posición vertical. Los resultados del análisis químico se han indicado en el Cuadro 3. La segregación corrientemente admitida no es muy grande, pero se pone de manifiesto claramente por decrecer el contenido de cal del mortero desde la parte superior de la probeta hasta el fondo, siguiendo una escala gravimétrica de densidades; por el contrario, el contenido del polvo de cuarzo aumenta desde la parte superior al fondo, y tanto más cuanto mayor sea la relación agua-cemento.

A fin de completar los resultados podemos añadir que, durante el proceso de fraguado de morteros con cemento aluminoso L, a temperatura baja, de 3°C (ver fig. 9), se observó una precipitación de gel de alúmina.

2.2 Influencia de la temperatura en el fraguado del mortero.

Por haberse comprobado que en la mayoría de los morteros se opera una separación del agua, y que la duración de esta separación es función de la temperatura del mortero en el momento de su preparación, ha sido necesario estudiar la influencia de la temperatura en el proceso del fraguado de los morteros objeto de esta investigación.

Los tiempos iniciales y finales se determinaron en estas invostigaciones sobre morteros que presentaban relaciones de agua-cemento de 0,50 y de 0,525 ó 0,55 a la temperatura de 19, 14, 8 y 3°C, y, a proximadamente, 0°C. En los morteros preparados con cemento aluminoso R, también se investigó la temperatura mínima que pueden fraguar, que resultó ser de -4°C; sólo al descender la temperatura de este valor, se pudo observar la formación de cristales de hielo en la superficie del espécimen. Además, se determinaron también los tiempos de fraguado de los restantes morteros, cuyas relaciones agua-cemento era de 0,75 y 1,00 a las temperaturas de 19°C y 3°C.

En la tabla 4 se han recopilado los resultados de estos ensayos. Complementariamente, en las figuras 10 y 11 se han representado los tiempos de fraguado de los morteros con relaciones agua-cemento de 0,5 y 0,525 ó 0,55. Esta forma de representación pone de relieve las cualidades características de cada uno de los morteros. A este respecto, tiene especial significación el efecto opuesto de la temperatura sobre los cementos Portland y aluminoso. En el caso de los morteros de cemento Portland, los tiempos de fraguado resultaron aumentar -algunas veces considerablemente-, con temperaturas más bajas; en los morteros de cemento aluminoso se llegó a un resultado de efecto opuesto. Como es evidente en la figura 11, el fraguado de morteros de cemento aluminoso R y relación agua-cemento de 0,50 a la temperatura de 20°C, tiene lugar solamente a las 14 horas después, mientras que el tiempo mínimo hallado ocurre a la temperatura de 0 a -2°C; es decir, de 4 h 05 m (fraguado inicial) a 4 h 35 m (fraguado final). Los morteros correspondientes amasados con cemento aluminoso L, no presentan semejantes diferencias; sin embargo, muestran la misma tendencia.

Los ensayos de fraguado se realizaron utilizando un aparato

to con aguja de Vicat, de acuerdo con las normas alemanas DIN 1164, para probetas de molde anular. Como precaución contra las pérdidas de agua o evaporación en el mortero se colocaron anillos de vulcanita sobre el cristal del fondo del molde, y se cubrió en la parte superior con una placa de cristal. Respecto al problema de precipitación, se puede inferir, teniendo en cuenta la influencia de la temperatura en el tiempo de fraguado, que los morteros investigados han tenido tiempo suficiente para que se pudiera realizar su fraguado.

2.3 Efectos de la helada sobre el mortero.

En cada uno de los casos, las probetas de mortero se sometieron a la helada a las 12, 36 y 168 horas (7 días), después de amasarlas. Inmediatamente después de amasar, el mortero se colocó en tubos de cristal de 1,00 m de longitud y 10 mm de diámetro interior. Estos tubos se sellaron con tapas de cristal o tapones de corcho. Antes de preparar las mezclas, los materiales y utensilios se enfriaron a 3°C . Los tubos que contenían las probetas de mortero permanecieron imperturbadas en una posición horizontal, y a 3°C , hasta que empezaron los ensayos de congelación. Se empezaron los ensayos con una temperatura de 3°C , después se iba descendiendo a razón de 1°C a intervalos de dos horas. Al llegar a -20°C , los ensayos se daban por terminados si los tubos no se habían roto antes. Como se hicieron tres probetas de cada clase de mortero y tiempo de exposición, se necesitaron 135 probetas en total. Los ensayos de congelación se efectuaron en una cámara refrigerante equipada con un control automático de temperatura que suministró la casa Brown, Boveri & Co.

En la figura 12 se puede apreciar el ensayo de refrigeración, realizado a un temperatura de -3°C y utilizando probetas de 7

días almacenadas en posición horizontal. Los otros ensayos se llevaron a cabo en una forma esencialmente similar. Las fuerzas debidas al aumento de volumen durante la cristalización del hielo se pudieron apreciar diferencialmente. En algunos casos, partículas de hielo fueron lanzadas hacia arriba hasta una altura superior a 1 m a partir del fondo de la cámara refrigerante.

Respecto a los ensayos de congelación, en general, se pueden hacer los comentarios siguientes: debido a la cristalización del agua en el proceso de transformación en hielo, se llega a un aumento de volumen alrededor del 1/11 ó 9%. Al enfriar por debajo del punto de cristalización, el volumen del hielo varía de la misma forma que lo haría un sólido. La temperatura de cristalización depende del tamaño de los huecos capilares, y, además, de la pureza química del agua. Debido a los constituyentes alcalinoterrosos del cemento que se hallan en solución en el agua, parte de ésta que se halla en exceso cristalizará únicamente con temperaturas bajo cero. Cuanto más baja sea la relación agua-cemento; tanto mayor será, naturalmente, el aumento relativo en concentración de los materiales que afectan el punto de congelación del agua.

Solamente, el agua químicamente libre del cemento puede cristalizar y, por tanto, ser causa de acciones nocivas debido a la congelación. Por consiguiente, el aumento de volumen del mortero debido a la formación de hielo será de menor importancia cuanto menor sea la cantidad de agua químicamente libre (V_{wu}), y la temperatura en que esto sucede será menor a medida que descienda la relación agua-cemento.

Los resultados de los ensayos de congelación se ponen de manifiesto, sistemáticamente, en el cuadro 5. Los recuadros no sombreados, indican que no ha habido grietas o fracturas en los tubos de cri-

tal para las temperaturas que se indican. Las probetas tratadas de esta forma, resistieron los ensayos de congelación. Los recuadros sombreados muestran las temperaturas de las cámaras refrigerantes a la que se desarrollaron las primeras grietas en las probetas. Los tapones que se han representado en algunos recuadros indican que estos fueron expulsados de los tubos durante la cristalización del hielo, porque no se ataron suficientemente (fig. 13). En los ensayos subsecuentes, estos defectos se eliminaron en su mayor parte. No cabe duda, sin embargo, que estos tubos se hubieran fracturado de resistir los tapones, como se puede apreciar en el tubo extremo a la derecha de la figura 13.

No fué posible evaluar dos de los resultados de los ensayos a 7 días, porque la fractura de los tubos en estos casos se podía atribuir a causas externas. Es necesario admitir, además, que el tubo nº 1 (36 horas), fila 1 ($A/C = 0,525$), no resistió al ensayo de congelación en la forma normal (18°C); sino que, debido a la incapacidad del tapón para sellar el tubo debidamente, parte del agua de amasado que ha sido separada se ha perdido y, por tanto, el hueco que tuvo esto dió al agua restante una oportunidad de expansión al cristalizar en hielo.

Los resultados de los ensayos mostraron:

- 1) Todos los ensayos hechos con cemento Portland PZ325 fracturaron.
- 2) Las probetas, hechas con cemento Portland PZ425, o sin agente aireante A, mostraron, aproximadamente, un comportamiento similar.
- 3) De las probetas preparadas con cemento aluminoso, los

cemento R son los que mostraron el comportamiento más satisfactorio.

Debe notarse, sin embargo, que debido a diferencias en la consistencia, las probetas no eran absolutamente comparables unas con otras. Un punto todavía más importante es que la edad de las probetas al empezar los ensayos de congelación (12, 36 y 168 horas después de amasar el mortero), no tenía efecto en el caso de cementos aluminosos.

El agente aireante añadido en la proporción prevista para estos ensayos, no aportó casi aumento alguno en la resistencia contra la helada. El mortero -en el que, debido al agente aireante, no se produjo prácticamente separación de agua- rompió los tubos a una temperatura aproximadamente igual a la del mortero que servía como plano de comparación y que no contenía agente aireante. A igualdad de relaciones de agua-cemento, sin embargo, la adición de un agente aireante no disminuye el riesgo de daños debidos a la helada. No obstante, es posible hacer uso de relaciones agua-cemento más bajas para obtener la misma docilidad; por ejemplo, la misma fluidosidad del mortero y, por tanto, mayor grado de resistencia contra la helada.

Este hecho debe tomarse en consideración igualmente, comparando los dos cementos aluminosos. El mortero preparado con cemento aluminoso L requiere, apreciablemente, menos agua que el amasado con cemento R, por lo que puede ser empleado con una relación agua-cemento de menos de 0,50. El ensayo de consistencia no se puede realizar con los tipos ordinarios de aparatos. Un ensayo de viscosidad da el resultado representado en la figura 14, del que se puede deducir que el mortero de cemento aluminoso R y 0,55 de relación agua-cemento, a igualdad de consistencia, corresponde, aproximadamente, a otro de cemento aluminoso L y 0,41 de relación agua-cemento. Por tanto, se puede concluir que, probablemente, dos series de probetas de morteros prepara-

dos con cemento L y 0,41 y 0,5 de relación agua-cemento respectivamente podrían resistir el ensayo de congelación.

En el cuadro 6 se pueden apreciar los resultados de otros ensayos utilizando cemento Portland PZ325 y polvo de cuarzo en la proporción de 2:1. Las temperaturas de almacenamiento previo a los ensayos eran diferentes. Las probetas correspondientes a la fila 1a se almacenaron a 3°C hasta el momento del ensayo de congelación, mientras que, en el caso de la fila 1b, la temperatura de almacenamiento fué de 20°C. Los resultados, generalmente, confirmaron la información ya adquirida en el primer ensayo de congelación, ya que todos los tubos se rompieron. Sin embargo, un hecho de bastante significación es que, como consecuencia de las condiciones favorables bajo las cuales se dejó madurar a las probetas, algunas de ellas, ensayadas a los 7 días, con relación agua-cemento de 0,525 y almacenados a la temperatura de 20°C, llegaron muy aproximadamente al límite inferior de temperatura del ensayo de congelación, es decir, -20°C, mientras que las probetas de igual edad, de la fila 1a, que han madurado mucho más despacio a 3°C, se mostraron en todos los casos solamente capaces de resistir a la congelación a los 6-4°C, aunque la relación agua-cemento fuera de 0,525 0,75 ó 1,00.

De los resultados anunciados anteriormente, obtenidos en los ensayos, no es posible decidir inmediatamente las causas actuales que dan lugar a los desperfectos experimentados por la acción de la helada; teniendo en cuenta las consideraciones generales que se han discutido, las relaciones entre el conjunto de materiales sólidos, el volumen de los poros y la cantidad de agua químicamente separada fueran objeto de una investigación más extensa. Si hubiese suficiente espacio disponible de poros para el agua químicamente no combinada en el instante de la cristalización del hielo, capaz de absorber el aumento

de volumen previsto entonces la constancia de volumen del mortero bajo las condiciones de la helada podría ser asegurado; de otra forma, esto equivale a admitir que cualquier mortero sería atacado por la helada si el volumen de sus poros libres de agua es menor del 9% del volumen del agua químicamente no combinada.

Teniendo en cuenta el hecho de que la serie de ensayos mencionados en el apartado 2.1 hay probetas en las que el agua se ha separado, el espacio de los poros libres de agua se puede expresar de la forma siguiente:

$$V_o = V_{set} + V_{wa},$$

de donde se desprende que:

$$V_L = (V_{set} + V_{wa}) - V_t - V_{wu}$$

Como el agua químicamente no combinada se relaciona también con V_o , debe satisfacer, para obtener la resistencia a la helada del mortero, la condición:

$$f_B = \frac{V_L}{V_{wu}} \cdot 100 > 9$$

En las columnas 16 y 17 de la tabla 2, los porcentajes correspondientes por volumen, por ejemplo W y L, han sido indicados valores que se han calculado de la forma siguiente:

$$L = \frac{V_L}{V_o} \cdot 100 = \frac{(V_{set} + V_{wa}) - V_t - V_{wu}}{V_{set} + V_{wa}} \times 100$$

$$W = \frac{V_{wu}}{V_o} \cdot 100 = \frac{V_{wu}}{V_{set} + V_{wa}} \times 100$$

Los valores de f_B de la columna 18 de la tabla 2 se han obtenido así:

$$f_B = \frac{L}{W} \cdot 100 = \frac{V_L}{V_{wu}} \cdot 100$$

Los valores calculados de esta forma confirman los resultados obtenidos en los ensayos de congelación. En todos aquellos casos en que los valores de f_B eran mayores del 9%, los morteros ensayados resistieron las pruebas de congelación. Esto se ha de considerar como una comprobación del grado de corrección de las consideraciones teóricas antes discutidas.

Con el objeto de obtener una comparación conveniente entre el volumen total de poros y la cantidad de agua separada, se ha complementado la figura 7 añadiéndole la cantidad apropiada de espacio de poros libre de agua y de agua químicamente no combinada (fig. 15).

3.- Conclusiones de otros casos de desperfectos y precauciones para prevenirllos

Durante la realización del primer programa de ensayos, detectaron defectos y desperfectos en otros puentes de hormigón pretensado y losas de calzadas pretensadas sobre puentes de vigas compuestas⁽¹⁾. En el caso de un tablero de puente aparecieron grietas continuas.

(1) La expresión puentes de vigas compuestas "Verbundträgerbrücken", se refiere, generalmente, a puentes de tablero de hormigón cooperando estructuralmente con el entramado metálico.

nugas en todos los nervios pretensados sobre la longitud total del puente; estas grietas han sido causa, además, de un desconchado considerable del hormigón en los lados de la losa del tablero. Los conductos de los nervios se abrieron para inspeccionarlos en varios puntos, hallándose una capa de hielo de 2 a 3 cm de espesor en el mortero. Dos capas de cables pretensados no estaban rodeadas de mortero, por lo que no ejercían adherencia alguna. En otro puente, se llegó a la conclusión, lejos de toda duda, que se había producido una segregación en el mortero durante las operaciones de inyección. Después de inyectar el conducto (el mortero se inyectó haciéndole recorrer los 50 m de la longitud de la losa hasta aparecer en la parte opuesta), al cabo de una hora se volvió a inyectar más mortero. Se pudo apreciar que salía agua clara del conducto inyectado. Después de esperar una hora más, se inyectó una vez más, con lo que volvió a salir agua clara del conducto hasta que tarde apareció el mortero nuevamente en la extremidad opuesta. No fue posible repetir la operación, ya que los conductos de inyección y la gran longitud de las vainas metálicas se hallaban obstruidas.

Esto no prueba, en modo alguno, que los conductos se hallan satisfactoriamente llenos de mortero en cualquier parte, o que la protección contra la corrosión estaba asegurada, o bien que el mortero garantizaba la adherencia adecuada para transmitir las tensiones corriente que se requiere en el apartado 6.2 de las normas alemanas DIN 4227.

En el puente últimamente mencionado, después de realizar las dos operaciones de reinyección, se perforaron una serie de taladros en varios puntos de las vainas metálicas de sección rectangular relativamente profunda como la usada. Se comprobó, invariablemente, que los cables pretensados superiores se hallaban desnudos, por lo que se decidió inyectar una cuarta vez. En vista de los defectos comprobados es esencial se controlen los conductos, aun a expensas del coste que es-

atención requiere.

Mientras tanto, círculos oficiales autorizados y empresas dedicadas al hormigón pretensado han llevado su atención a las causas de los defectos que se han encontrado. Con objeto de determinar las precauciones que se han de tomar para evitar las consecuencias tremamente serias de segregación y baja resistencia contra la helada del mortero en el futuro, se reunió, en Munich, en septiembre de 1951 el Comité Ejecutivo para tratar, en forma exhaustiva, del problema sobre el mortero que debía emplearse en las inyecciones del hormigón pretensado. La discusión se basó en los desperfectos que se habían observado y en los resultados de los ensayos anteriormente descritos, así como los de un segundo programa de ensayos basados en información fresca, que había sido obtenida, igualmente, por el laboratorio de ensayos de materiales de la Jefatura de vías fluviales y navegación de Munich para la conferencia del Comité de Morteros. Estos ensayos se describirán más adelante. Mientras, y siguiendo las discusiones del Comité Ejecutivo de Munich, se dictaron las normas provisionales para la inyección de mortero. Los Organismos ministeriales más caracterizados han dictado normas similares. Prácticamente se publicarán estas normas y notas expositivas.

4.- Resultados del segundo programa de ensayos

Las conclusiones generales deducidas de las observaciones en obras antes mencionadas, así como de los resultados de los ensayos se refieren, igualmente, a la composición, preparación e inyección del mortero. Se admite, generalmente, que no solamente la composición, sino los métodos de mezcla e inyección del mortero, requieren una mejora considerable. La experiencia actual en la preparación del mortero es

hormigoneras de gran velocidad, seguida inmediatamente de la inyección por medio de bombas adecuadas, ha sido satisfactoriamente admitida. Con estos medios solamente, pero usando la composición como hasta aquí empleada, no es posible, sin embargo, garantizar un mortero que no dé segregación o que sea resistente a la helada.

Para la mezcla del mortero empleado en la ejecución del segundo programa de ensayos, se desarrolló una hormigonera rápida, de 1.500 r.p.m., para uso del laboratorio, que se mostró altamente satisfactoria. Las comparaciones de muestras de morteros preparados en varias obras con ayuda de una hormigonera para "Colcrete", dieron diferencias no esenciales con respecto a la continuidad de la mezcla perfecta y fluidez. De acuerdo con el agua requerida por los cementos finos y productos adicionales, la cantidad de agua de amasado se determinó de tal manera, que todas las mezclas dieron el mismo grado de fluidez, por lo que se podía esperar obtener igual docilidad en las mezclas. Las probetas se almacenaron a la temperatura de 19°C hasta el momento de los ensayos.

La elección de cementos apropiados presentó dificultades especiales, ya que todos los cementos Portland empleados en el primer programa de ensayos resultaron insatisfactorios respecto a la resistencia contra la helada.

Como el laboratorio de la industria cementera de Westfali de Beckum, consideró que sólo muy pocos cementos eran apropiados a este objeto, se empleó un cemento Portland especial PZ 325, de la zona Beckum, de acuerdo con las sugerencias que se habían formulado, para el segundo programa de ensayos. Este cemento contiene solamente 4,5% de aluminato tricálcico; su contenido de silicato tricálcico se halla generalmente por debajo del 50%, y se caracteriza por su resistencia

los ataques del sulfato. Además, se eligió el cemento Portland PZ 425 para la primera serie de ensayos, y, con propósito comparativo, se utilizó el cemento aluminoso R, que mostró el comportamiento más satisfactorio en el primer programa de ensayos. En el Cuadro 7 se dan los resultados de los análisis químicos y de los ensayos normales de los cementos.

Los morteros ensayados comprenden morteros sin áridos y morteros a los que se ha añadido polvo de cuarzo (molienda normal G2), en la proporción 2:1 y 4:1 para la relación cemento-polvo de cuarzo.

La cuestión de aditivos requiere una consideración especial. Se sabía que los efectos del aumento de volumen se podían lograr añadiendo polvo de aluminio, de donde el volumen deseado de aire en los poros se puede obtener en ciertas circunstancias. Desgraciadamente, no se disponía de suficiente experiencia respecto al polvo de aluminio empleado. En la fabricación de bloques ligeros Ytong, la acción que motivaba el aumento de volumen, por ejemplo, la evolución del gas hidrógeno, empieza inmediatamente después de añadir el polvo a la mezcla. Como regla general, este proceso se termina a los 20 minutos. Cuando se usa el polvo de aluminio en el mortero, la reacción química no debe empezar hasta que el mortero ha sido inyectado, es decir, que sólo se permite que empiece unos 20 minutos después de haber mezclado. Debida a estas exigencias, se eligió un polvo de aluminio que presentaba, comparativamente, pequeña área superficial (partículas esféricas en lugar de planas). Debe notarse que la velocidad de reacción depende, en gran medida, de la clase de cemento empleado (en particular, el contenido de cal libre del cemento es un factor determinativo en la reacción).

Los investigadores conocían el uso de la bentonita para m...

jorar la calidad del mortero y hormigón. Debido a su gran capacidad de absorción de agua, causa del aumento de volumen y entumecimiento, se creyó razonable esperar que, por lo menos, se obtendría una reducción en la segregación y huecos. Respecto a la resistencia contra la helada, no se tenía información basada en la experiencia al alcance.

El efecto del agente aireante A se tuvo que probar entre los límites del 0,2 al 2 % de dicho producto añadido a la mezcla, ya que los fabricantes pretendían que el uso de hasta el 2 % de dicho compuesto no daba una pérdida apreciable en la calidad que se esperaba obtener del mortero.

En principio se intentó el uso del tras como material aditivo, pero, como ya se había experimentado en el caso de morteros sin áridos que la adición de tras aumentaba considerablemente la cantidad de agua necesaria para el amasado (relación agua-cemento de 0,70 a 0,80), se decidió no llevar a cabo más ensayos utilizando el tras como producto aditivo. Por esta misma razón, el tras no debe utilizarse como árido.

Se realizaron la siguiente clase de ensayos:

- 1) Ensayo de congelación, 48 horas después de amasar el mortero.
- 2) Ensayo de congelación, 7 días después de mezclar el mortero.
- 3) Ensayo de exudación.
- 4) Determinación del volumen de poros libres de agua a las 48 horas después de amasar.
- 5) Determinación del volumen de poros libres de agua a los 7 días de amasar.
- 6) Ensayos de resistencia a la tracción en flexión y a la compresión.

los 28 días.

- 7) Determinación de la retracción a los 28 días.
- 8) Ensayos de fraguado.

Cementos

(.1) Cemento Portland PZ 425⁽¹⁾

(.2) Cemento Portland PZ 325.

(.3) Cemento Aluminoso R.

Áridos

(..1) Sin áridos.

(..2) Polvo de cuarzo G2, mezclado en la proporción cemento polvo de cuarzo = 2:1

(..3) Polvo de cuarzo G2, mezclado en la proporción cemento-polvo de cuarzo 4:1

Productos aditivos

(...1) Sin productos aditivos.

(...2) Agente aireante A 0,2 % con, aproximadamente, 4 % de poros.

(...3) Agente aireante A 2 % con, aproximadamente, 10 % de poros.

(1)

Las abreviaciones alemanas PZ & Z se refieren al cemento Portland y cemento, respectivamente. Los números 325 y 425 denotan el grado o calidad; los dos tipos se han clasificado como cementos rápidos. El cemento ordinario Portland se ha denominado PZ 225.

- (...4) Polvo de aluminio 3 gr por 50 Kg de cemento
- (...5) Bentonita de 3 a 4 %.
- (...6) Tras 2:1

Al desarrollar el programa, pronto se puso en claro qué clase de mortero no presentaba posibilidades de éxito y los que satisfacían a todos los requerimientos. Por lo que se pudo abbreviar el programa suprimiendo ciertas series de ensayos. Si no se hubiera operado así, el programa de ensayos no se hubiera completado en el tiempo de que se disponía. Los diagramas que recopilan los resultados muestran las series de ensayos que se suprimieron en cada caso.

Los resultados del segundo programa de ensayos se han indicado en la tabla 8. Con objeto de lograr una imagen más clara de la forma de los resultados de los ensayos, éstos se han representado en los gráficos de las figuras 16 y 17.

Además de la resistencia a la tracción por flexión y compresión, tienen gran importancia los criterios respecto a la calidad del mortero, es decir, relación agua-cemento, grado de separación ($V_n - V_{set}$), volumen de los poros en la solidificación del mortero (V_p), el volumen del agua químicamente no combinada (V_{wu}), el volumen resultante de poros libres de agua y los valores f_B . Como muestran los ensayos, ninguno de los morteros investigados tenían todas las cualidades deseadas de un mortero realmente bueno.

Debido a la pequeña cantidad de agua químicamente no combinada y a la gran proporción de poros libres de agua, los morteros de cemento aluminoso R fueron, según se admitió, resistentes a la helada en todos los casos; por otra parte, sin embargo, particularmente con respecto a la potencialidad acomodable a las composiciones (combinaciones

311, 312 y 321 de la tabla 8), la cantidad de exudación para aproximadamente iguales valores de la relación agua-cemento (0,48 a 0,50) era muy elevada. Del hecho de que el grado de separación en el caso de probetas de 7 días de las series 321 (cemento aluminoso R con polvo de cuarzo en la proporción 2:1) es, aproximadamente, cuatro veces de la correspondiente a probetas de 2 días (fig. 16), debe concluirse que, en este caso, nos encontramos frente, no solamente de un mero fenómeno de exudación, sino -en el presente caso predominantemente-, con efectos de retracción. Para casos prácticos, no obstante, no tiene gran importancia conocer la proporción de retracción que corresponde a la separación y la causada por la retracción propiamente dicha; las consecuencias desfavorables de una adherencia inadecuada serán las mismas en cada caso. El efecto de la retracción se manifiesta con toda sencillez en el caso de morteros de cemento Portland y polvo de cuarzo. El volumen de poros es menor, proporcionalmente, a medida que la separación o retracción es mayor.

Las series de ensayos con cementos aluminosos, 2 % del agravante aireante A y 0,006 % de polvo de aluminio se comportaron, a este respecto, muy favorables; pero no se pueden considerar como adecuados por las dificultades anteriormente mencionadas y su resistencia sorprendentemente baja.

El grado de separación en los morteros de cemento Portland PZ 425, incluso el mortero de tras (.116), resultó ser pequeño. Las relaciones agua-cemento variaban de 0,46 a 0,525. Por otra parte, el contenido de poros de este mortero (como el mortero con PZ 325) era bastante grande, y, por consiguiente, otro tanto ocurría con el volumen de agua químicamente no combinada. Todo esto dió por resultado, a su vez, una reducción del espacio de poros libre de agua; así, pues, y como regla general, sólo las probetas ensayadas a los 7 días alcanzaron valores para f_B de 9 ó más y, por tanto, resistentes a la helada. Constitu-

ye una excepción las series con el 2 % de agente aireante A; en este caso, las probetas de dos días también resistieron en los ensayos de congelación. Sin embargo, las dos series que contenían traz no resistieron al ensayo, debido a la gran cantidad de agua que requerían (relación agua-cemento de 0,80).

Es interesante notar que, las series .121 (PZ 425 con polvo de cuarzo 2:1) y las .116 (PZ 425 y 3 % de bentonita) resistieron en los ensayos de congelación, aunque los valores de f_B fueron de 8,3 y 4,63, respectivamente; es decir, menos de 9. En el caso de las series .121, las discrepancias se pueden considerar como centradas dentro de los límites de dispersión de los resultados, mientras que en las series .116, la causa debe estudiarse en las propiedades especiales de la bentonita que, como ya se hizo notar, posee una gran capacidad de absorción de agua y una estructura con un reticulado de estratificación de una acción que se podría comparar a la de un acordeón, que le da marcadas propiedades estructurales elásticas (1.2). Se sabe que, dentro del orden del tamaño de las partículas coloidales, la absorción del agua en forma de agua higroscópica tiene tanta importancia como el agua de hidratación. En el proceso de hidratación de partículas coloidales, las moléculas de agua se atraen por el reticulado de absorción y por los iones adheridos a él. En el caso de agua higroscópica, que constituye la capa interna del agua de combinación y forma la transición entre el agua más sueltamente combinada y el material sólido, el agua tiende a acumularse alrededor de las partículas más finas de la sustancia. No solamente es atraída por los iones, sino que se concentra más o menos. Por tanto, se puede admitir que lo importante no es la formación de una superficie frontera del agua, sino la forma que ella se "ajusta" al reticulado cristalino de la estructura. Así, en el caso de la montmorillonita de la bentonita -

nos encontramos ante un reticulado de estratificación extensible, mientras que en el caso de la kaolinita aparece un reticulado rígido. Por el contrario, una gran proporción de agua de absorción no se concentra densamente, mientras que el agua higroscópica se desprende parcialmente a temperaturas de hasta 105° (en la proporción del 60 % según Kelly, Jenny y Brown), y el resto queda "ajustada" a la estructura del reticulado de cristal (1.2). La cantidad de agua químicamente no combinada es mayor al aumentar la de absorción y, por tanto, los valores de f_B han de descender en la justa correspondencia.

Los resultados obtenidos con morteros de cemento Portland PZ 325, difieren de los correspondientes a las series con cementos PZ 425, principalmente, porque la relación agua-cemento es más baja (excepción hecha de las series que emplean el tras), pues oscila entre 0,3 a 0,44. Teniendo en cuenta este fenómeno, sorprende que el grado de separación de las series .211 y .212 (PZ 325 sin áridos adicionales, relación agua-cemento de 0,41 y PZ 325 con el 0,2 % de agente aireante A y relación agua-cemento de 0,41, respectivamente), es tres veces mayor que con PZ 425. El volumen de poros y el de agua químicamente no combinada es algo menor en el PZ 325 que en el PZ 425; por tanto, la proporción de poros libres de agua, y por consiguiente los valores de f_B , resultan ser algo más favorables.

Los resultados obtenidos con los morteros preparados con polvo de cuarzo y molienda normalizada tipo G2, merecen una referencia especial. Con proporciones de mezcla de 2:1, relación agua-cemento de 0,56 y una cantidad razonable de agua químicamente no combinada, la resistencia a la helada solamente se obtuvo con probetas ensayadas a los 7 días; mientras que en los ensayos de las series con proporciones de mezcla de 4:1, los efectos de una adición variable de un agente aireante A a la mezcla fueron objeto de observación. Se llegó al resultado d

que la adición del agente aireante A en las proporciones de 0; 0,2; 0,5; 1 y 2 %, conservando la misma relación agua-cemento, es decir, 0,46 y 0,48, el grado de separación y la cantidad de agua químicamente no combinada disminuía, mientras que el volumen de poros, la proporción de poros libres de agua, y por tanto los valores de f_B , experimentaron el correspondiente aumento. De ello se puede deducir que, si el polvo de cuarzo se sustituye por otro árido que requiera menos agua, se obtendrá un mortero resistente a la helada que no segregará resueltamente, aun con porcentajes normales de 0,2 a 0,5% del agente aireante A.

Con excepción de las series que contienen cemento Portland PZ 325, las resistencias de las probetas de casi todos los morteros eran considerablemente menores que las determinadas en los ensayos normales de los cementos. Tanto con PZ 425 como particularmente con el cemento aluminoso R, el efecto de no almacenar las probetas en agua, como se exige en los ensayos normales, se presentó verdaderamente notable. La idea adoptada, sin embargo, consistió en que los ensayos debían ajustarse a las condiciones que actualmente prevalecen en obra. Así, pues, los morteros comparables de puro cemento presentaron, en la resistencia de probetas cúbicas a los 28 días, las reducciones siguientes:

$$629-425 = 204 \text{ Kg/cm}^2 = 32,5 \% \text{ con PZ 425}$$

$$865-309 = 556 \text{ Kg/cm}^2 = 64,5 \% \text{ con cemento aluminoso R.}$$

Las reducciones de resistencia en flexión, correspondientes a los 28 días, fueron:

$$90,1 - 73,9 = 16,2 \text{ Kg/cm}^2 = 18 \% \text{ con PZ 425}$$

$$70,0 - 30,9 = 39,1 \text{ " } = 56 \% \text{ con cemento aluminoso R.}$$

Sólo las series de ensayos con PZ 425 con polvo de cuarzo en la proporción 2:1 lograron, aproximadamente, la misma resistencia en

flexión que la obtenida en el ensayo normal, es decir, 95 Kg/cm² contra 90,1 Kg/cm².

Los resultados de los ensayos de retracción se han representado en las figuras 18 y 19. Entre estos dos grupos de curvas no aparecen diferencias de mayor significación. Como era de esperar, las series de ensayos con PZ 425 son las que dieron más retracción, mientras que los morteros con PZ 325 son los que dieron menos. Como regla general, la retracción aumentaba con los aditivos empleados, como era de esperar. El valor mínimo de la retracción, a los 28 días, en el mortero .221 de PZ 325 con polvo de cuarzo en la proporción 2:1, fuó de 0,14 mm en probetas de 16 cm de longitud. Contrariamente, en las series .113 con PZ 425 con 2 % de agente aireante A, el valor máximo hallado fuó de 0,36 mm.

Los resultados adquiridos en el programa de la primera serie de ensayos fueron confirmados en su totalidad. Debo prestarme especial atención al hecho de que, conjuntamente con el cemento alumino so R, el cemento Portland OPZ 325 empleado en los ensayos, resultó ser un cemento que, si la mezcla experimenta una mejora en su conjunto, probablemente satisfará a todas las condiciones exigidas a un buen cemento. Ni los ensayos ni esta discusión dan luz para encontrar la receta de la composición de un mortero que se encuentra perfecto a todos los respectos. Aparte ciertos principios y reglas guía, la decisión referente a la composición, preparación e inyección, habrá de dejarse en gran medida a la empresa contratante del hormigón pretensado. Corresponde pues, a estas empresas, asumir la mayor parte de esta tarea en cooperación con las instituciones dedicadas a la investigación. La intención en el desarrollo de este trabajo será la de encontrar la composición más eficiente del mortero, bajo un punto de vista técnico y

económico, así como de un método satisfactorio de mezcla y su inyección.

A pesar de las discordancias descritas, el segundo programa de ensayos dió una confirmación ulterior del criterio adoptado en la resistencia a la helada del mortero. Así, pues, no sólo probablemente se ha encontrado la causa de muchos casos de desperfectos, sino el método de determinación de la resistencia contra la helada, lo que permite aplicar ensayos ya aprobados.

5.- Proposiciones para el ensayo y aprobación de morteros

Con objeto de realizar ensayos admitidos de morteros, la fluidez, grado de separación y resistencia a la helada han de ser probados como complemento a las propiedades de resistencia, Walz ha puesto métodos muy simples y efectivos para la determinación de la fluidez y grado de precipitación.

La resistencia contra la helada del mortero se puede establecer, teóricamente, por el procedimiento anteriormente descrito, determinando los valores de f_B . Los diagramas de las figuras 20 y 21 simplifican en gran medida la labor de determinar el volumen de poros que se halla libre de agua y los valores de f_B . Los ejemplos muestran prácticamente el modo de empleo de estos gráficos. En el ejemplo de la figura 20, la intersección de la línea de valor 47.57 paralela a la dirección de la V_{wu} con la 44.58 paralela a la V_p , se halla situada en una zona en la que el mortero no es resistente a la helada. Un procedimiento más sencillo consiste en hacer los ensayos de congelación usando un dilatómetro del tipo desarrollado y empleado por el laboratorio de ensayos de materiales de Munich (fig. 22), de acuerdo con las sugerencias de Valore. Este aparato consiste en un recipiente de acero den-

tro del cual se coloca la probeta cilíndrica de ensayo que se ha de probar en la cámara refrigerante o equipo similar. Entre las paredes del recipiente y la probeta se coloca mercurio o un líquido que se presta a este tipo de medidas. El recipiente se cierra con una tapadera desmontable, a la que se le ajustan los instrumentos de medida (termómetro micro-bureta).

Los ensayos que se han realizado hasta la fecha han demostrado que sería deseable la incorporación de un par térmico. Además, se está intentando la transmisión de las medidas, eléctricamente, a un indicador colocado en el exterior de la cámara refrigerante. No obstante el elevado grado de precisión alcanzado, del orden de $0,001 \text{ cm}^3$, el aparato es de manipulación extremadamente sencilla. Un ensayo de congelación de solo unas pocas horas es suficiente para determinar la resistencia a la helada. Si se observa una expansión de la probeta, tal como se puede apreciar por la subida del nivel de la columna de mercurio, entonces el mortero ensayado no es resistente a la helada. Por otra parte, si el mortero es resistente a la helada, el mercurio descongelará, debido al descenso de la temperatura.

6.- Recopilación

Los ensayos que se han efectuado se pueden considerar como la demostración de que los desperfectos que aparecen en las estructuras de hormigón pretensado, después de los períodos de la helada, son atribuibles a los efectos de la helada en el mortero que envuelve a los cables. En general, la razón probable sería que el mortero no contenía la proporción requerida de poros libres de agua. A fin de satisfacer estas exigencias, el volumen de estos poros se elevará, por lo menos, un 9 % del volumen del agua químicamente no combinada, teniendo en cue-

ta el aumento de volumen del agua en el momento en que la cristalización del hielo tiene lugar.

Además, se ha visto, que los tipos de mortero que se han empleado hasta la actualidad, con frecuencia muestran una marcada tendencia a la segregación, así como a causar la separación del agua de amasado, debido a la composición del mortero y al método empleado en su preparación. Conjuntamente con el desarrollo sistemático de la composición de los morteros, los métodos de mezcla e inyección tendrán también que mejorar considerablemente.

Los procedimientos para asegurar la resistencia contra la helada han sido propuestos con el propósito de presentar una proposición para ensayos de tipo normal.

J. J. U.

- - -

BIBLIOGRAFIA

- (1) ENDELL, J.- Bentonit im Baugewerbe. Die Bautechnik. Vol. 30, Nº 3, Marzo, 1953, págs. 71-73.
- (2) KEIL, K.- Die physikalisch-chemischen Grundlagen des Hydratationsverfahrens. Die Bautechnik. Vol. 31, Nº 11, Noviembre 1954, págs. 366-368.
- (3) WALZ, K.- Eigenschaften von Zementsuspensionen zum Auspressen. (Properties of cement suspensions for grouting) Beton und Stahlbetonbau. Vol. 49, Nº 9, Septiembre 1954, págs. 205-211.
- (4) VALORE, R.C.- Volume changes in small concrete cylinders during freezing and thawing. Journal of the American Concrete Institute. Vol. 21, Nº 6, Febrero 1950, págs. 417-434.

The distribution of cement in bulk, (D. Werner) (6/1948). Original sueco.

The nature and characteristics of cements and limes made in France, (J. Cleret de Langavant) (6/1948). Agotado. Original francés.

Accelerators and retarders of the setting of cement, (J. Brocard). (8/1948). Original francés.

Cement and non-ferrous metals, (Cementbulletin, Switzerland) (10/1948). Original alemán.

The transport of bulk cement by compressed air, (H.W. Carlsen), and The cement station on the site, (H. W. Carlsen) (3/1949). Original sueco.

The transport of bulk cement in special bags, (H. W. Carlsen) (3/1949). Original sueco.

The variety of applications of prestressed concrete, (M. Lalande) (6/1949). Agotado, original francés.

Design and construction of flat slab floors, (A.M. Haas) (6/1949). Original holandés.

The rheology of fresh concrete and vibration, (R. L'Hermite) (6/1949). Original francés.

Prestressed concrete reservoir at Orleans, (M.F. Robert and M.P. Lebello) (6/1949). Original francés.

The construction of aircraft hangars in prestressed concrete at the Melsbroek airfield near Brussels, (H.C. Duyster) (2/1950). Original holandés.

Prestressed concrete bridge at Bleibach, (Arthur Laemmlein and Ulrich Wichert) (2/1950). Original alemán.

Chemical analysis and the compound composition of Swiss Portland cements, (Hch. Schwarz) (2/1950). Original alemán.

Prestressed concrete for a large business block - Shop and offices of Vroom and Dreesman at Heerlen, (G. Baar) (3/1950). Original holandés.

Characteristics of standard mortars, (A. Joisel) (5/1950). Original francés.

A concrete slab bridge prestressed by the Baur-Leonhardt method, (Kramer and Franz Rek) (6/1950). Original alemán.

The bridge over the Port Canal at Heilbronn, (Rgbm. Albert Kaiser) (6/1950). Original alemán.

The comparative cost of a bridge in prestressed and reinforced concrete, (Oberregieungsbaurat Arthur Lammlein) (6/1950). Original alemán.

The new prestressed concrete bridge in the Rue De Smet over the Canal de Raccordement (junction canal) at Ghent, (Riessauw, Van depitte, Dooms and van Cauwenberge) (9/1950). Original francés.

Tests on prestressed concrete beams in Holland, (Ir. G. Baar) (9/1950). Original holandés.

The use of electrical resistance strain gauges in measuring deformations in plain and reinforced concrete, (Jean Chefdeville and Guy Dawance) (10/1950). Original francés.

The self-stressing of concrete by expanding cements, (Henry Los-sior) (12/1950). Original francés.

Recent research on concrete, (Rober L'Hermite) (1/1951). Original francés.

The resistance to fatigue of wires used in prestressed concrete (W. Soete and R. Vancrombrugge) (1/1951). Original francés.

Concrete and penetrating rays (1/1951). Original francés.

The application of prestressed concrete to road construction, (Fritz Leonhardt) (1/1951). Original alemán.

The prestressed cable (Dr J.A.H. Hartmann) (1/1951). Original holandés.

The measurement of the forces and their variation in accessible wires in prestressed concrete structures -- its application to Sclayn bridge, (E. Dehan and H. Louis) and The measurement of linear variations of cables and its applications to Sclayn bridge, (F. Cattelain) (2/1951). Original francés.

Method of construction using precast concrete shuttering slabs (H. Kaufmann) (2/1951). Original alemán.

Doubly curved thin slab structures, (M.P. Borkowski) (2/1951). Original polaco.

The determination of the ultimate bending strength of prestressed concrete beams, (Emil Mörsch) (3/1951). Original alemán.

A study of continuous beams and of some statically redundant systems in prestressed concrete, (M.Y. Guyon) (3/1951). Original francés.

Design specifications for structural members in prestressed concrete, (Hubert Rüsch) (3/1951). Original alemán.

Casting properties of fresh concrete, (Major Per Hallstrom) (5/1951). Original sueco.

Prestressed concrete in Denmark including some projects for Sweden and Finland, (Chr. Osterfeld and W. Jonson) (5/1951). Original danés.

The reconstruction of a reinforced concrete bridge over the Leine near Ruthe, which was destroyed by a flood in 1946, (W. Meiners) (6/1951). Original alemán.

Distribution of cement in bulk in Sweden, (Bengt Wiking) (8/1951). Original sueco.

Note on the duration of vibration of concrete, (H. Manche) (8/1951). Original francés.

The surface treatment of plain and reinforced concrete structures, (E. Ernst) (11/1951). Original alemán.

The compacting of concrete by internal vibrators during the building of the runway surface at Munich-Reim airport, (W. Tzschenke) (12/1951). Original alemán.

Gap graded concrete, (Victor Bahrner) (1/1952). Original sueco.

- Now large prestressed concrete roof constructed in Romo, (Riccardo Morandi) (9/1952). Original italiano.
- Graffito, (Karl Lade and Adolf Winkler) (10/1952). Original alemán.
- Air-entrained concrete, (T. Heilmann) (10/1952). Original danés.
- German Reinforced Concrete Association Report Nº 105, (O. Graf) (12/1952). Original alemán.
- Gas concrete foamed concrete lightweight lime concrete, (O. Graf) (2/1953). Original alemán.
- The Ederstrom Bridge by Grifte, (Klaus Kober) (2/1953). Original alemán.
- Cast stone facing, (A. Vettiger) (5/1953). Original alemán.
- Construction of the road bridge over the Rhine at Worms, (Ulrich Finstrowalder) (6/1953). Original alemán.
- Amstel Bridge at Amsterdam in Government Highway Nº 2, constructed partly with prestressed concrete deck, (Dr G.F. Janssonius) (8/1953). Original holandés.
- Exposed concrete (Hans Höltken) (10/1954). Original alemán.
- Finishing machines for concrete road construction (1/1955). Original alemán. J. Theiner.
- Provisional paper on joints in concrete roads, (Le Service Technique des Bases Aériennes) (3/1955). Original francés.
- Complete protection of structure against damage to mining subsidence, (F. Wasilkowski) (8/1955). Original polaco.
- Prestressed concrete power-hammer foundation with controlled vibrations, (M.G. Behar) (12/1955). Original francés.
- Observations on the construction of concrete road slabs (W. Schönberg) (1/1956). Original alemán.
- A contribution to the problem of the symmetrical two-rib T beam under one-sided loading, (A. Mehmel and H. Beck) (1/1956). Original alemán.
- The birth of prestressing, (Eugène Freyssinet) (1/1956). Original francés.
- Ferro-cement: its characteristics and potentialities, (Pier Luigi Nervi) (7/1956). Original italiano.

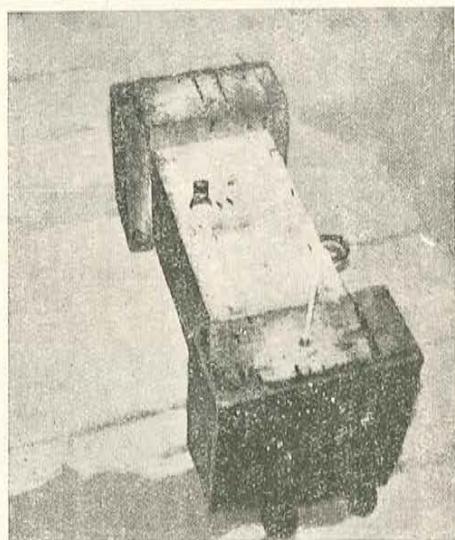


Fig. 1.

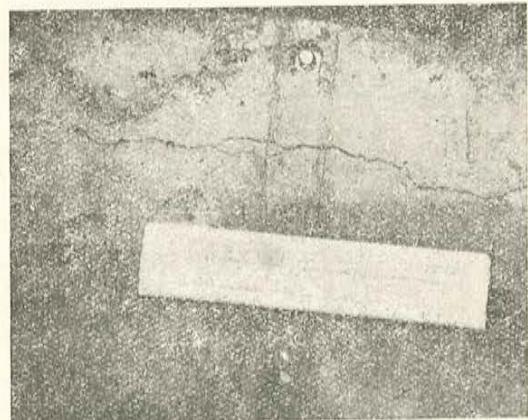


Fig. 2.

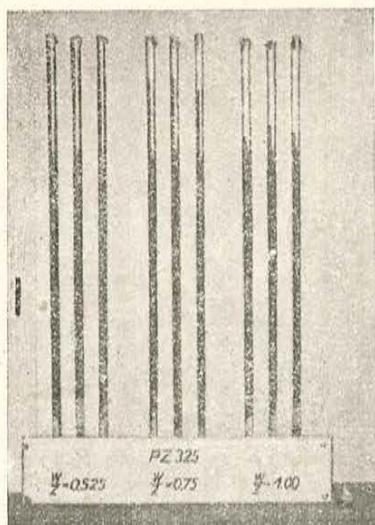


Fig. 3.

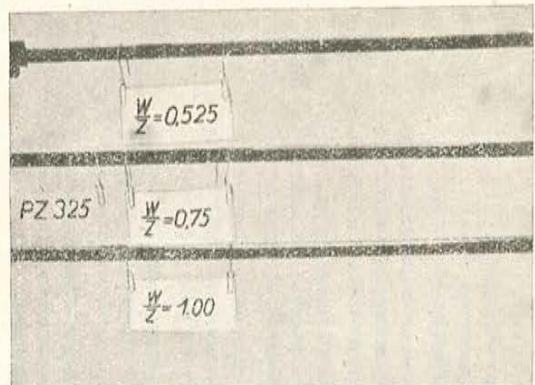


Fig. 4.

Fig. 1.—Aspecto general de una probeta de hormigón pretensado para someterla a ensayos de congelación.

Fig. 2.—Grietas, después de los ensayos de congelación.
Fig. 3.—Precipitación (agua segregada) de las muestras de mortero retenidas en posición vertical.

Fig. 4.—Precipitación (agua segregada) de las muestras de mortero conservadas en posición horizontal.

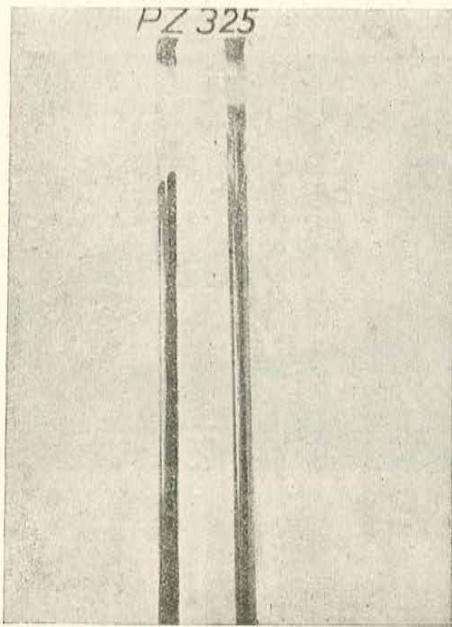


Fig. 5.

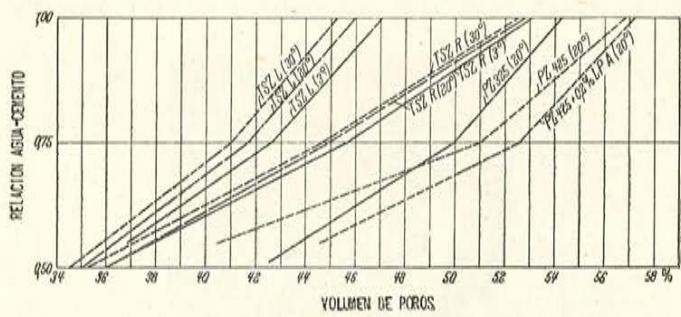


Fig. 6.

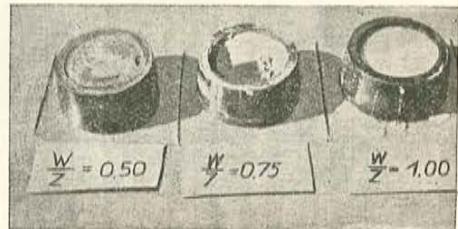


Fig. 9.

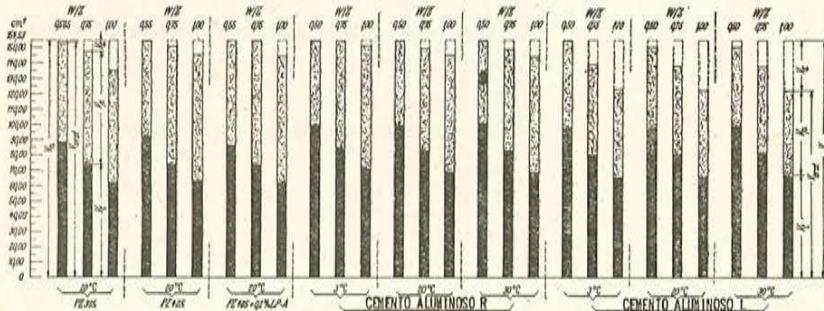


Fig. 7.

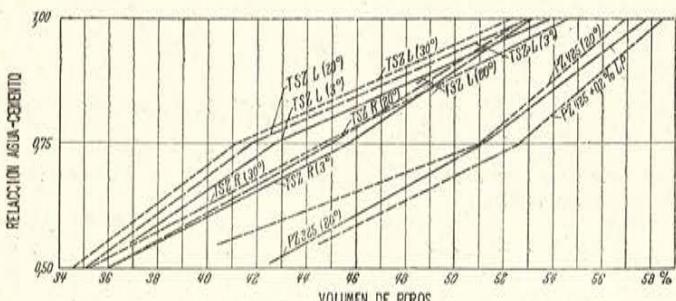


Fig. 8.

Fig. 5.—Los tubos se rompieron en las partes llenas de mortero (A/C de 1,00 y 0,75), pero no donde se reunía el agua separada. Sobre el agua se formaba una capa de aire.

Fig. 6.—Volumen de poros de mortero solidificado en función de la relación agua-cemento y temperatura.

Fig. 7.—Diagrama mostrando las proporciones de materias sólidas (V_s), volumen de poros (V_p) y reducción en volumen (V_d) del volumen total (V_f) del mortero fresco.

Fig. 8.—Volumen de poros en el mortero solidificado respecto a $V_f = V_{set} + V_{wa}$ y varias relaciones agua-cemento y temperaturas.

Fig. 9.—Fraguado de cemento aluminoso L, con precipitado de gel de alúmina.

—— TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO } CON CEMENTO PORTLAND Z 425+POLVO DE CUARZO EN
 —— TIEMPO FINAL DE FRAGUADO } PROPORCIÓN 2:1 Y RELACIÓN AGUA-CEMENTO DE 0.55
 —— TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO } CON CEMENTO PORTLAND Z 325+POLVO DE CUARZO EN
 —— TIEMPO FINAL DE FRAGUADO } PROPORCIÓN 2:1 CON RELACIÓN AGUA-CEMENTO 0.525

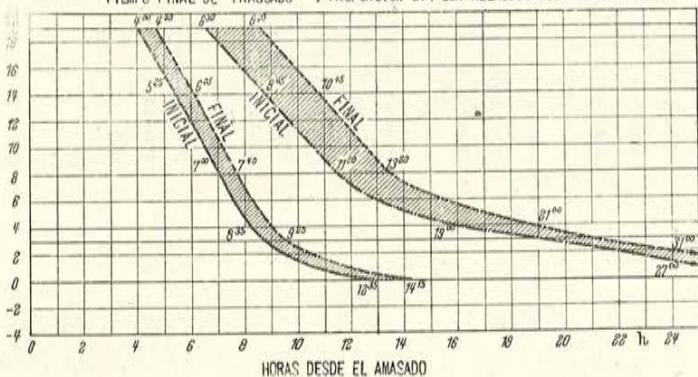


Fig. 10.

—— TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO } CONCRETO ALUMINOSO L+POLVO DE
 —— TIEMPO FINAL DE FRAGUADO } CUARZO EN PROPORCIÓN 2:1 Y RELA-
 —— TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO } CIÓN AGUA-CEMENTO DE 0.50
 —— TIEMPO FINAL DE FRAGUADO } CON CEMENTO ALUMINOSO R+POLVO DE
 —— TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO } CUARZO EN PROPORCIÓN 2:1 Y RELA-
 —— TIEMPO FINAL DE FRAGUADO } CIÓN AGUA-CEMENTO DE 0.50

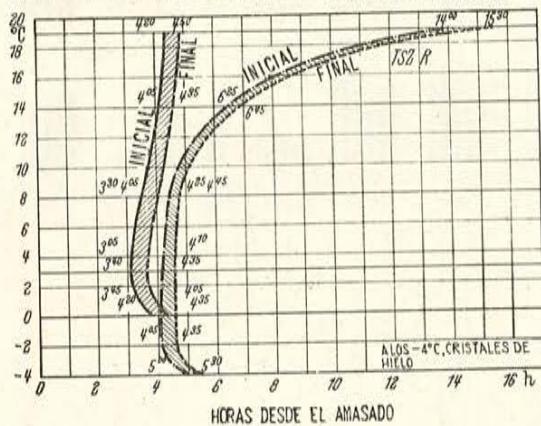


Fig. 11.

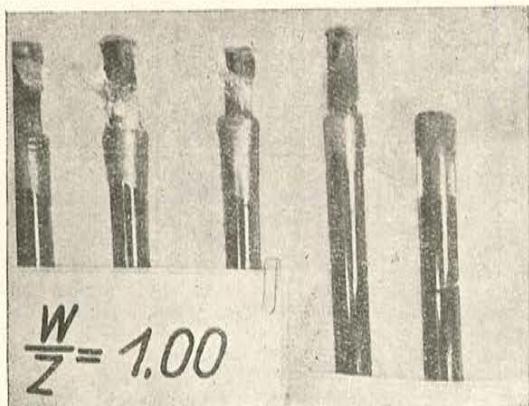


Fig. 13.

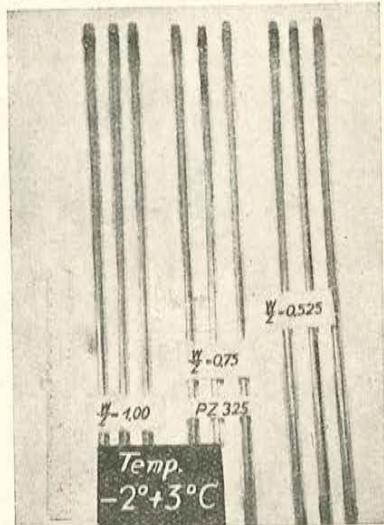


Fig. 12.

Fig. 10.—Tiempos de fraguado de morteros con cemento Portland.

Fig. 11.—Tiempos de fraguado con morteros de cemento aluminoso.

Fig. 12.—Ensayo de congelación de probetas de siete días, guardadas en posición horizontal.

Fig. 13.—Ensayo de congelación con probetas de doce horas de edad, conservadas en posición horizontal. En 8 de las 9 probetas, los tapones fueron expulsados de los tubos, y, en una de ellas, el tubo se rompió.

Fig. 14.—Comparación de viscosidades de morteros amasados con dos cementos aluminosos L y R, y polvo de cuarzo en la proporción 2:1, con diferentes relaciones de agua-cemento.

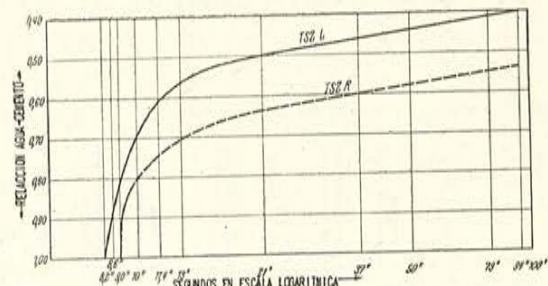


Fig. 14.

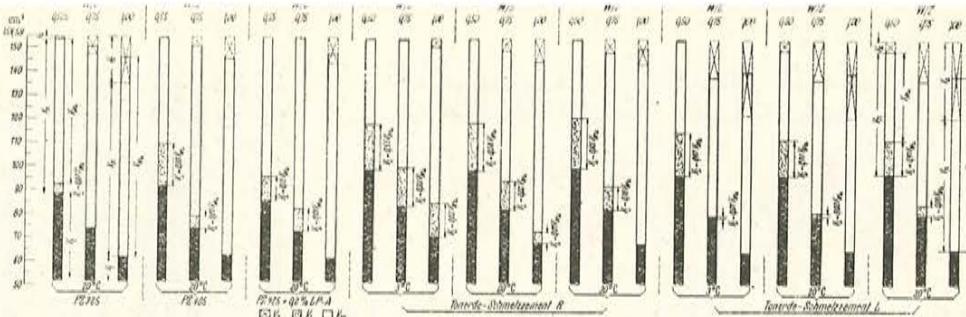


Fig. 15.

TIEMPO DE LAS PROBETAS

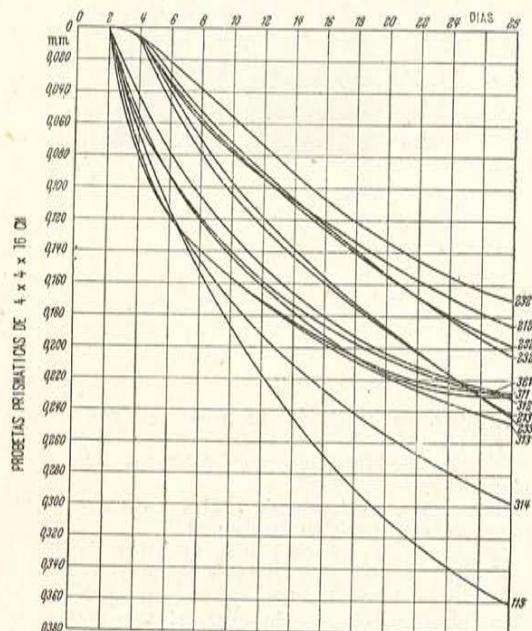


Fig. 16.

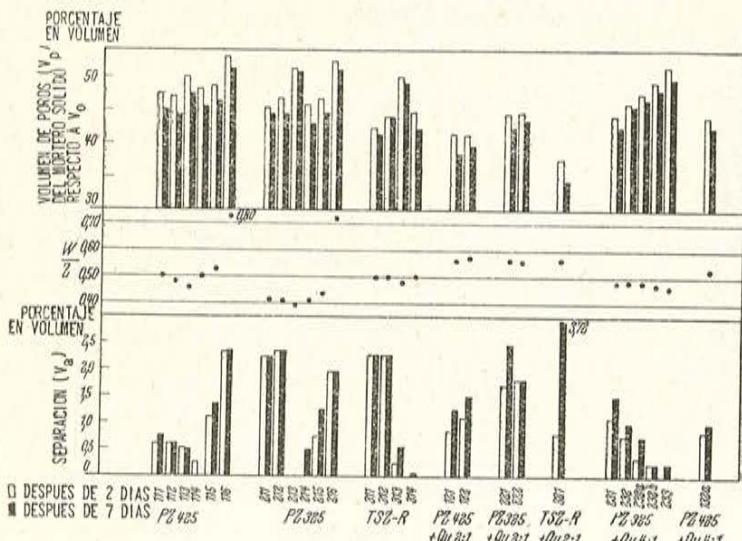


Fig. 17.

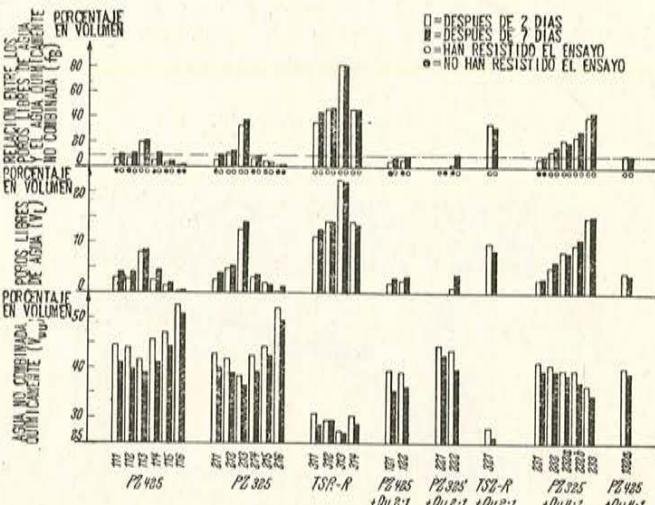


Fig. 18.

Fig. 15.—Diagrama mostrando las proporciones de materiales sólidos (V_s), poros libres de agua (V_L), agua químicamente no combinada (V_{wu}), volumen de los poros en el mortero solidificado (V_p), y reducción del volumen debido a precipitaciones (agua separada) del mortero fresco (V_a). Véase la fig. 7.

Fig. 16.—Diagrama de los valores V_{wu} , V_L y A/C .

Fig. 17.—Diagrama de los valores V_{wu} , V_L y f_B .

Fig. 18.—Resultados de las determinaciones métricas de la retracción (con morteros que resistieron satisfactoriamente en los ensayos de congelación).

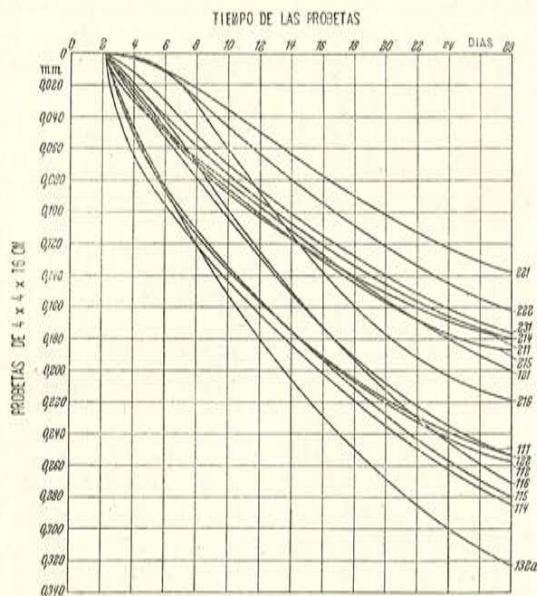


Fig. 19.

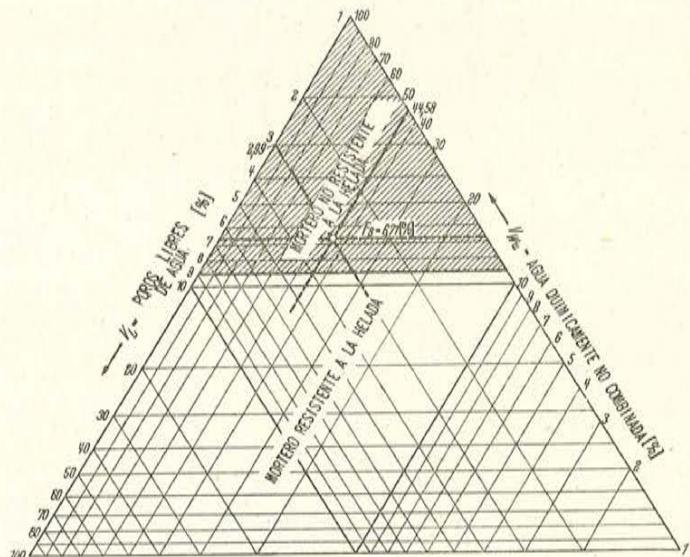


Fig. 21.

Fig. 19.—Resultados métricos de los ensayos de retracción (morteros que no resistieron en los ensayos de congelación).

Fig. 20.—Diagrama triangular para la determinación de la adaptabilidad del mortero respecto al agua químicamente no combinada W_{WU} y volumen de poros en la masa solidificada V_p . Ejemplo: Probeta de mortero núm. 111 a los dos días.

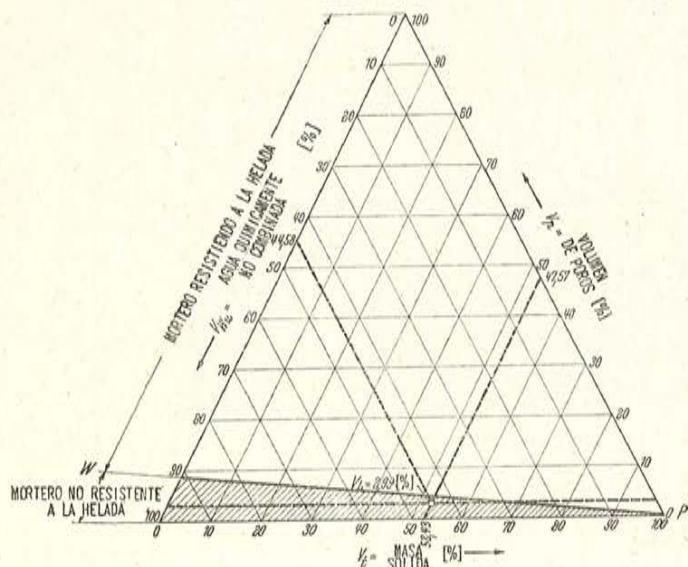


Fig. 20.

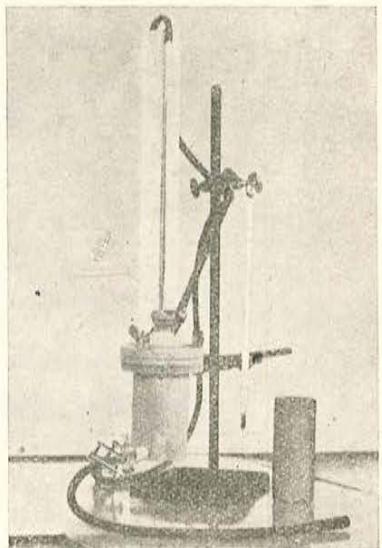


Fig. 22.

Fig. 21.—Diagrama triangular para la determinación de la adaptabilidad del mortero respecto al agua químicamente no combinada V_{Wu} y poros libres de agua VL . Ejemplo: Mortero de la probeta núm. 111.

Fig. 22.—Dilatómetro para la determinación de la resistencia a la helada de los morteros.

2

Determinación del volumen de poros libres de agua y de los valores de f_R .

$$V_n = 154 \cdot 59 \text{ cm}^3$$

Y-SOLO GAMBOL - V

HOBBY & CRAFTS FOR THE HOME

TABLA 5

Resultados de los ensayos de congelación (ensayos principales)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Nº DE SERIE	MORTERO	A/C	ENFRIAMIENTO DEL MORTERO									7.D.
			12 H.	36 H.	1	2	3	1	2	3	1	
1	CEMENTO PORTLAND 325+ POLVO DE CUARZO 2:1	0.525	-25° -25° -25°	-35° -35° -35°	-5° -5° -5°	-5° -5° -5°	-5° -5° -5°	-7° -7° -7°	-14°			
		0.75	-25° -25° -25°	-5° -5° -5°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3°			
		1.00	-25° -25° -25°	-5° -5° -5°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3° -3° -3°	-3°			
2	CEMENTO PORTLAND 425+ POLVO DE CUARZO 2:1	0.55	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-20° -20° -20°	-75°			
		0.75	-8° -8° -8°	-8° -8° -8°	-8° -8° -8°	-8° -8° -8°	-8° -8° -8°	-20° -20° -20°	-20°			
		1.00	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-10°			
3	CEMENTO PORTLAND 425+POLVO DE CUARZO 2:1 0.2% AGENTE AIRFANTE A	0.50	-5° -9° -5°	-6° -5° -4°	-6° -5° -4°	-6° -5° -4°	-6° -5° -4°	-20° -20° -20°	-20°			
		0.75	-6° -6° -7°	-4° -3° -3°	-4° -3° -3°	-4° -3° -3°	-4° -3° -3°	-20° -20° -20°	-20°			
		1.00	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6°			
4	CEMENTO ALUMINOSO I+ POLVO DE CUARZO 2:1	0.50	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20°			
		0.75	-6° -5° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6°			
		1.00	-5° -6° -6°	-5° -6° -6°	-5° -6° -6°	-5° -6° -6°	-5° -6° -6°	-5° -6° -6°	-5°			
5	CEMENTO ALUMINOSO R+ POLVO DE CUARZO 2:1	0.50	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20°			
		0.75	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20° -20° -20°	-20°			
		1.00	-20° -20° -45°	-20° -3° -20°	-20° -3° -20°	-20° -3° -20°	-20° -3° -20°	-20° -3° -20°	-10°			

LEYENDA  CRISTAL ROTADO A -40°C TAPON EXPULSADO A 2.5°C

TABLA 6

Resultados de los ensayos de congelación (ensayos secundarios)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Nº DE SERIE	MORTERO	A/C	ENFRIAMIENTO DEL MORTERO									7.D.
			12 H.	36 H.	1	2	3	1	2	3	1	
1a	CEMENTO PORTLAND 325+POLVO DE CUARZO 2:1. PROBETAS ALMACENADAS A 30°C.	0.525	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	-4° -2° -2°	
		0.75	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	-45° -45° -45°	
		1.00	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	-35° -35° -35°	
1b	COMO ANTES. PROBETAS ALMACENADAS A 20°C.	0.525	-7° -6° -6°	-5° -7° -7°	-5° -7° -7°	-5° -7° -7°	-5° -7° -7°	-18° -12° -15°	-75°			
		0.75	-6° -6° -6°	-7° -7° -7°	-6° -7° -7°	-6° -7° -7°	-6° -7° -7°	-6° -7° -7°	-7° -7° -7°	-7°		
		1.00	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6° -6° -6°	-6°		

LEYENDA  CRISTAL ROTADO A -40°C TAPON FORZADO EXPULSADO A -3.5°C.

TABLA 7

Ensayos normales, de acuerdo con la instrucción DIN 1164, y análisis químico de los cementos empleados.

	I CEMENTO PORTLAND 425	II CEMENTO PORTLAND 325	III CEMENTO ALUMINOSO R
ENSAYO NORMAL	I	II	III
FINEZA DE MOLIENDA (TAMIZ DE 4.900 MALLAS)	0.84	9.73	3.48
AGUA NECESARIA (CONSISTENCIA NORMAL)	28%	24.3%	26.7%
TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO	2 h 00 min	1 h 50 min	3 h 10 min
TIEMPO FINAL DE FRAGUADO	2 h 35 min	2 h 15 min	5 h 00 min
ENSAYO DE EBULLICION	RESISTIO EL ENSAYO	RESISTIO EL ENSAYO	DESCONCHADO SUPERFICIAL
ENSAYO CON AGUA FRIA	RESISTIO EL ENSAYO	RESISTIO EL ENSAYO	DESCONCHADO SUPERFICIAL
RESISTENCIAS :			
DE FLEXION			
A LAS 24 HORAS, Kg/cm ²	41.4	-	18.3
A LOS 3 DIAS, Kg/cm ²	69.4	46.5	65.8
	78.0	55.1	70.1
	90.1	69.6	69.1
DE COMPRESSION			
A LAS 24 HORAS, Kg/cm ²	187	-	107
A LOS 3 DIAS, Kg/cm ²	377	213	638
A LOS 7 DIAS, Kg/cm ²	492	280	736
A LOS 28 DIAS, Kg/cm ²	629	388	865
ANALISIS QUIMICO	RESULTADOS EN PORCENTAJES DEL PESO		
ACIDO SILICICO	SiO ₂	19.6	22.2
ALUMINA	Al ₂ O ₃	11.4	4.8
SEQUOXIDO DE HIERRO	Fe ₂ O ₃	4.2	4.0
CAL	CaO	63.8	64.3
OXIDO DE MAGNESIO	MgO	2.8	2.1
SULFATO	SO ₃	1.6	2.0
INSOLUBLES EN ACIDOS		0.2	0.2
CLORO	Cl	0.0	0.0
PERDIDA POR CALCINACION		0.6	0.4

