

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

617-43 NUEVAS TÉCNICAS PARA EL ESTUDIO DEL FRAGUADO Y ENDURECI-
MIENTO DE LOS AGLOMERANTES HIDRAULICOS.

V - Aceleración del Fraguado mediante Calefacción por Efecto Joule
José Calleja Carrete, Doctor en Ciencias.

- - -

R E S U M E N

Como complemento del estudio experimental acerca de --
la influencia de la temperatura en el fraguado, aplicando para --
ello una técnica original, y cuyos resultados ya fueron dados a --
conocer en este boletín (véase U.A.M.C. nº 32), presentamos ahora
nuevos datos acerca de la aceleración del fraguado por el calor,
cuando éste es aportado mediante energía eléctrica (efecto Joule).

Las distintas condiciones experimentales en que se han
llevado a cabo los ensayos y los resultados obtenidos de los mis-
mos, ponen de manifiesto que las curvas R-t en todo caso, o bien
las V-t e I-t cuando se trabaja a intensidad constante o tensión
constante respectivamente, acusan con toda precisión el curso y
final del fraguado y la influencia aceleradora del calor creado --
por el paso de corriente a través de las probotas. Las curvas T-t
son inoperantes en estos casos, a los efectos mencionados.

Los resultados por el momento obtenidos estimulan a --
realizar un estudio posterior de carácter técnico-económico en --
cuanto a resistencias mecánicas logradas, tiempo y energía inver-

tidos en los tratamientos, etc., con vistas a la resolución de -
problemas de prefabricación y de hormigonado en tiempo de invierno
no.

I - Introducción y Antecedentes Bibliográficos.

La aceleración del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos y de sus productos derivados, por la acción del calor, es tema que suscita un gran interés técnico en varios aspectos. Uno es el de la prefabricación de elementos para la construcción, en todo tiempo, y de modo especial en circunstancias de gran demanda. Tal sucede en los periodos de post guerra en los que se impone una recuperación en todos los ordenes a marchas forzadas.

Otro aspecto es el de la posibilidad de hormigonar en obras de cualquier tipo y en particular de gran volumen, tales como grandes presas, en épocas y lugares en que las condiciones climatológicas normalmente lo impiden o, al menos, lo dic ficultan.

La solución o soluciones son las mismas en ambos as pectos, aunque difieren en cuanto al modo de su aplicación. En general, en los casos citados se trata de producir un acortamien to del plazo al cabo del cual las piezas o estructuras que se doscan, adquirirían en circunstancias normales las característi cas mecánicas exigidas, sin que el logro de esto lleve consigo una merma de dichas características a plazos más largos. Ello se consigue provocando una aceleración de los procesos de fra guado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos y por tan to de los aglomerados (morteros y hormigonos) elaborados con ollos.

Esta aceleración puede lograrse por medios químicos o físicos y a veces por la conjunción ventajosa de ambas acciones.

Los primeros consisten en el empleo de adiciones - adecuadas y en la dosis más conveniente, generalmente añadidas al agua de amasado en el momento de tal operación, las cuales - por acción química producen el efecto deseado, sin ser perjudiciales en otros aspectos. Esta última condición limita en la mayoría de los casos, la cuantía de la acción de las adiciones de tipo químico.

Entre ellas cabe citar, por su extendido empleo en el hormigonado durante el tiempo de invierno, el cloruro cálcico. Acerca de cuanto concierne a la condiciones de uso de este producto y de los resultados obtenidos con el mismo, la bibliografía va siendo más extensa de día en día. Así por ejemplo, en la referencia (1)* se compendian cerca de doscientos artículos que desde 1885 a 1952 han sido publicados en todos los idiomas, respecto del empleo del cloruro cálcico en el hormigón, considerando dicho empleo desde diferentes puntos de vista. A partir - de 1952 en adelante siguen publicándose trabajos relacionados - con el tema.

Entre los métodos físicos para acelerar el fraguado y obtener elevadas resistencias mecánicas a corto plazo, se cuenta la acción del calor aplicado en diversas formas. En cuanto a

* Las llamadas como la (1) precedente corresponden a la Bibliografía inserta al final del artículo.

la influencia de la temperatura en el fraguado, en una publicación anterior se expusieron los resultados experimentales de un estudio realizado mediante la aplicación de una nueva técnica (2).

La aportación de calor para lograr un curado acelerado del hormigón ha de ir acompañada de las adecuadas condiciones de humedad y suele hacerse, en general, utilizando vapor libre - en cámaras de curado, o a presión en autoclaves. El procedimiento está bastante extendido en diversos países y particularmente en Norteamérica, donde se utiliza de preferencia para la prefabricación en condiciones económicas. En efecto, una instalación racional de prefabricación de piezas por el método del curado - acelerado exige, para una producción prefijada, un mínimo, tanto por lo que se refiere a espacio como por lo que afecta a moldes, mano de obra etc., con la ventaja de reducir muy considerablemente el tiempo preciso para tener a disposición del usuario, un volumen dado de producción, útil para ser empleado en el acto.

Igualmente en este orden va extendiéndose el número de publicaciones en todos los idiomas y, si bien la cita (3) recoge ochenta trabajos sobre el tema hasta el año 1951 inclusive, puede decirse que de modo casi continuo van apareciendo nuevas y más modernas aportaciones.

En cuanto a los métodos de acelerar el fraguado y endurecimiento del hormigón en masa, particularmente en obras de gran volumen (presas, carreteras y pistas de aterrizaje, por ejemplo) en épocas y parajes en que predominan las bajas temperaturas, aquéllos van desde las ya citadas adiciones de tipo químico, como las de cloruro cálcico, consagradas por la experiencia, hasta el caldeo por electricidad mediante el efecto Joule, pasando

por el calentamiento previo del cemento, áridos y agua de amasado. En tales casos, como en alguno de los citados anteriormente, suelen resultar bien los procedimientos mixtos a base de aplicación externa de calor y adición de un acelerante de tipo químico en dosis adecuada.

No son los citados los únicos métodos de aplicación de calor en industrias de la construcción o afines a ella. Así por ejemplo, el caldeo mediante rayos infrarrojos se ha empleado para el secado de pinturas (4), de materiales diversos (5), de materiales cerámicos (6) y también concretamente para el curado de pastas de cemento, morteros y hormigones (7).

Es interesante hacer constar que los resultados obtenidos al tratar de acelerar el fraguado y endurecimiento de cementos, morteros y hormigones mediante aportación de calor, son sumamente análogos, independientemente del modo como este calor se aplique, siempre que las restantes condiciones del curado, especialmente las de humedad y las referentes al curso de la temperatura, sean análogas en todos los casos. Tal prueban los resultados de trabajo de Ferrer Maluquer citado en último lugar (7), comparados con los de otro publicado con anterioridad (2), y aún con los que se exponen en el presente. Una indicación en el mismo sentido fué hecha ya por Brund (11).

En el secado y encolado de la madera se han utilizado igualmente, desde la convección de aire caliente, hasta la calefacción dieléctrica (8), pasando por las radiaciones infrarrojas y el caldeo por efecto Joule (9).

Ensayos de aceleración de fraguado mediante caldeo por alta frecuencia se están llevando a cabo en la actualidad -

y se ha observado que el efecto producido es análogo al obtenido con otros procedimientos (10).

Es precisamente en el aspecto de la calefacción eléctrica por efecto Joule en cuanto a su influencia aceleradora del fraguado del cemento, en el que se fija la atención del presente trabajo.

Los primeros intentos de tratamiento electrotérmico del hormigón con vistas a acelerar el fraguado y obtener resistencias elevadas a corto plazo, son los de Brund en 1932 (11). Estudió la aplicación de una corriente alterna de bajo voltaje, llegando a los mismos resultados que se obtendrían al calentar por cualquier otro procedimiento, y sin efectos secundarios. El consumo de energía en las condiciones de trabajo de Brund fué 1 kilowatio-hora por metro cúbico de hormigón tratado.

Ya por la misma época Baire (12) estudió el paso de corriente eléctrica a través de una pasta de cemento con objeto de fijar el momento de comienzo de fraguado. En las condiciones de trabajo de Baire era un gran inconveniente, que él mismo señaló, el calentamiento de la pasta debido al efecto Joule, lo que modificaba, acelerándolo, el fenómeno que pretendía estudiar. Evitaba tal dificultad haciendo pasar la corriente de manera no continua sino intermitente, y sólo durante los pocos segundos precisos para hacer la medida. Posteriormente se ha visto que dicho inconveniente se elimina utilizando corriente de muy débil intensidad, o bien detectando magnitudes eléctricas cuya medida no exija prácticamente el paso de corriente a través de la pasta objeto de ensayo. (25), (26).

En 1934 Wichmann dió cuenta, en un trabajo, de los resultados de unas experiencias realizadas en gran escala en la Unión Soviética con "electro-hormigón" (13). A grandes rasgos, consistían en hacer pasar corriente a través de la masa de hormigón recién vertida en el encofrado, durante 6-18 horas, alcanzándose rápidamente una temperatura de 80°C que se mantenía después. En ensayos posteriores se fijó en 10 horas el tiempo de tratamiento, obteniéndose al cabo de éste iguales resistencias que a 10 días en condiciones normales, o a 2 días de conservación en atmósfera de vapor a 70-80°C. En los ensayos de rotura se puso de manifiesto la importancia que en los resultados tiene el tiempo o la velocidad de enfriamiento, después de tratado el hormigón.

El consumo de energía fué de 0,65-0,95 kilowatios-hora por metro cúbico de hormigón para producir una elevación de temperatura de 10-15°C/hora, partiendo de una temperatura inicial de 5-20°C y alcanzando una final de 85°C en 4-6 horas. El enfriamiento duraba 3-4 horas.

Decoux y Barróc (14) han estudiado la conductividad eléctrica de los hormigones durante el endurecimiento a distintas edades, y tratado de aumentar aquélla mediante adiciones de tipo salino, tales como cloruro sódico y cálcico, y también magnetita y limaduras de fundición de hierro. Observaron que la conductividad depende más del contenido en agua y de la proporción de aglomerante que de la edad del hormigón. En todo caso se aumenta con los tratamientos señalados.

L'Hermito (15) tiene patentado en Francia un procedimiento para acelerar el fraguado del hormigón por calentamiento eléctrico de una solución electrolítica que hace función de agua

do amasado y en la que se contienen sustancias aceleradoras del fraguado y reforzadores de resistencia mecánica.

Entre otros varios métodos de calefacción para provocar la aceleración del fraguado y el endurecimiento, Brocard (16) ha estudiado también el efecto Joule en condiciones experimentales diversas. Observó aceleraciones notables y también caídas de la resistencia a 28 días con relación al curado normal, según las condiciones de trabajo. Tales caídas de resistencia parecen debidas a desecaciones que perjudican la marcha normal de los procesos de hidratación, habiéndose observado que disminuyen y aún se evitan manteniendo las probetas en un ambiente de humedad adecuada y constante durante el curado. Brocard concluye que el tratamiento eléctrico es bueno, aunque caro, y que, al ser difícil dar indicaciones acerca del régimen eléctrico, es preciso buscar las condiciones óptimas de trabajo para cada caso particular.

Tolichin y Wegener (17) han abordado el problema del agrietamiento del hormigón, producido durante el calentamiento por electricidad.

Los resultados de las investigaciones de ingleses y americanos sobre los efectos de los tratamientos eléctricos en la resistencia del hormigón armado, desde los primeros trabajos en 1913, han sido recogidos por Mole (18). En la correspondiente publicación se hace referencia a tratamientos con corriente alterna y continua y a la influencia de la polaridad de la armadura en este último caso. También se toca el problema de la adherencia armadura-hormigón, el de la corrosión de aquélla y la acción que en tal sentido ejercen determinadas adiciones, en especial las de cloruro cálcico.

Netushil (19) ha estudiado recientemente el campo térmico creado por un electrodo en el hormigón.

Los tratamientos eléctricos han sido propuestos también para la reparación de los suelos de hormigón en cámaras frigoríficas, lugares en que necesariamente la temperatura de curado habría de ser muy baja en condiciones normales. A tal efecto Mac Intosh (20) ensayó el calentamiento del hormigón con corriente alterna a tensión constante observando, en sus condiciones de trabajo, una elevación rápida de temperatura hasta un máximo de 65-85°C y un decrecimiento posterior lento. En tales condiciones no es preciso controlar la corriente. Estudió también la influencia de la temperatura máxima alcanzada, el enfriamiento, las adiciones de cloruro cálcico y la desecación producida en el hormigón (16) (17) desapareciendo los efectos de ésta cuando se recubre toda la superficie del hormigón tratado, con una capa de agua alrededor de 1 cm. de espesor.

Prescindiendo del efecto secundario de pérdidas de calor, el dispositivo experimental adoptado por Mac Intosh tiene las características de un modelo reducido, por lo que los resultados obtenidos son trasladables a la escala real.

Con objeto de determinar si la calefacción mediante vapor y por efecto Joule acelera lo suficiente el endurecimiento como para poder pretensar piezas al cabo de uno o dos días, Rös (21) ha experimentado ambos procedimientos de aceleración, concluyendo que los resultados son buenos, comparados con los de la práctica, y que tanto con uno como con otro se obtienen las resistencias deseadas en unas seis horas, si la temperatura máxima alcanzada es de 70°C. En cualquier caso conviene y debe evitarse la de

secación durante el tratamiento. Según Rös la calefacción eléctrica es más económica debido a la posibilidad de aprovechar mejor el calor en la zona que interese.

En 1951 Sander (22) ha llevado a cabo un estudio preliminar acerca del templado por electricidad de vigas de hormigón de 5 m. de longitud, comenzando el tratamiento de una a dos horas después del enmoldado. El voltaje se determinó por la fórmula $E = \rho \sqrt{VT}$ en que t era la distancia en dm. entre electrodos, T el aumento de temperatura en °C/hora y ρ la resistencia específica del hormigón por dm³. Se supuso un valor medio aproximado para ΔT (aumento de temperatura con el tiempo), de 10°C/hora. Influye en los resultados la distancia entre electrodos y la temperatura máxima alcanzada, sin que el autor pueda emitir conclusiones definitivas, salvo que la temperatura no debe rebasar un cierto límite máximo.

Itakura en fecha reciente (23) ha expuesto el método y los resultados de la calefacción eléctrica del hormigón en obras durante el invierno, haciendo referencia a cerca de ochenta estructuras realizadas en Japón septentrional. Hay que señalar que la calefacción eléctrica del hormigón está prescrita en este país. Para Itakura el caldeo por efecto Joule es más cómodo y económico que cualquier otro medio de calefacción, siendo aplicable tanto a hormigón en masa como armado. En el primer caso el coste del tratamiento supone un 10% y en el segundo un 10-15% del coste total de la obra. Con hormigón armado hay que evitar un calentamiento prolongado de la armadura y la temperatura máxima alcanzada no debe sobrepasar los 40°C. Se aconseja reducir la cantidad de agua, utilizar tensiones bajas, procurar que el aumento de temperatura

sea uniforme, comenzar el tratamiento a las 2-3 horas de vertido el hormigón, emplear adiciones salinas convenientes y hacer que la temperatura inicial sea lo más próxima posible a la final al cabo del tratamiento. Se estudia la influencia de la densidad de corriente, de la frecuencia en el caso de utilizar corriente alterna, así como de algunas otras variables.

Clarkson (24) en un estudio relativo al hormigón tratado por el calor, cita de pasada la calefacción eléctrica, bien a través de su masa o bien entre las armaduras, en el caso del armado. Cree que estos métodos se prestan al tratamiento de piezas individuales, pero que son costosos y de acción ligera o moderada.

Los tratamientos eléctricos no sólo han sido aplicados al hormigón desde el punto de vista del curado acelerado (o accidentalmente desde el punto de vista de la adherencia de las armaduras (18)), sino que también tienen utilidad, en diversos aspectos, en industrias y materiales que como las arcillas, cerámica, porcelana etc., están íntimamente ligados a la construcción. Sin contar con los resultados de los fenómenos electroosmóticos aplicados al secado, endurecimiento y consolidación de suelos, de todo lo cual existe igualmente una profusa y cada día más completa bibliografía.

El estudio y observación de la marcha del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes (cementos, pastas puras), así como de los aglomerados a base de aquéllos (morteros y hormigones), es difícil o imposible empleando técnicas clásicas, particularmente cuando dichos fenómenos se hacen transcurrir a temperatura elevada, mediante aportación de calor por un medio cual -

quiera. Sin embargo, ello es posible y fácil cuando se adopta una técnica adecuada (2) (25).

Uno de los objetivos del presente trabajo es presentar en este sentido los resultados de una tal técnica aplicada al estudio del fraguado y endurecimiento de aglomerantes sometidos a un curado mediante calefacción por efecto Joule. De paso se confirman algunas ideas, ya anteriormente expuestas, acerca de la semejanza de resultados obtenidos por cualesquiera métodos empleados en el curado utilizando calor. En todos estos casos la técnica adoptada permite seguir de manera continua y precisa, sin perturbar el proceso del fraguado, la marcha de éste, así como determinar con gran exactitud el momento en que ha concluido. Permite asimismo, en el caso del curado por efecto Joule, establecer relaciones de gran interés práctico entre las variables eléctricas manejadas, el curso de la temperatura, los tiempos de fraguado e incluso las resistencias logradas, de todo lo cual indudablemente pueden deducirse conclusiones útiles.

- - - -

II. Plan de trabajo.

Dada la utilidad y ventajas que, al menos en determinados casos, puede tener el curado del hormigón por calefacción eléctrica, según se desprende de la precedente revisión bibliográfica, ha parecido oportuno tratar de aplicar un nuevo método al estudio y conocimiento de la marcha del fenómeno del fraguado en

uno de los casos en que, como en el que nos ocupa, no es fácil o posible obtener información mediante otros métodos hasta el momento más usuales.

Por otra parte, puesto que la técnica a emplear ya fué utilizada en un trabajo anterior, con ocasión de estudiar la influencia de la temperatura en el fraguado y la marcha de este proceso a temperaturas superiores a la normal (2), ha parecido también útil el comprobar si, a la luz de la citada técnica, el curado mediante caldeo por efecto Joule presenta alguna particularidad o diferencia respecto de otros métodos distintos de aplicación de calor, en cuanto se relaciona con la marcha del fraguado.

Dado que la calefacción por electricidad cabe aplicarla en diferentes condiciones experimentales por cuanto se refiere a la marcha y valores de las variables eléctricas que se manejan, se creyó asimismo procedente el aplicar la técnica elegida a casos en que las citadas condiciones experimentales eran distintas.

Siempre que fuera posible se pensó en tener como referencia la marcha de la temperatura con el tiempo en las experiencias efectuadas, al mismo tiempo que se tiene la correspondiente evolución temporal de la variable o variables eléctricas consideradas en cada caso.

Lo expuesto en lo que precede llena un primer aspecto teórico comparativo que es el que se trata en la presente comunicación.

El aspecto práctico es decir, las relaciones entre los valores dados a las variables eléctricas y los resultados técnicos y económicos obtenidos, a saber, resistencias mecánicas de las probetas sometidas a tratamiento, y energía gastada en el mismo, son objeto de un estudio aparte.

En él se incluyen también la fijación previa de las condiciones experimentales aproximadas en que hay que trabajar para obtener unos resultados dados, así como la determinación de valores prácticos para ciertas magnitudes de interés en el cálculo y proyecto de ensayos de curado mediante calefacción por efecto Joule.

De estos aspectos se dará cuenta en otro lugar.

- - - -

III - Técnica utilizada.

En los ensayos efectuados para estudiar la aceleración que la corriente eléctrica produce en el fraguado del cemento, debido al efecto Joule, se ha empleado la misma técnica de la que se hizo uso en trabajos anteriores (2) (25) (27) (28).

Se ha estudiado el fraguado de la pasta pura de un cemento dado, en condiciones casi adiabáticas, procurando mantener dentro de la mayor constancia posible las variables que no eran objeto de un estudio directo en cada caso.

En la pasta recién amasada y enmoldada, con el porcentaje de agua correspondiente a su consistencia normal, se introdujeron electrodos de hierro de 2 x 4 cm., separados a una distancia de 4 cm., a los que se aplicó una corriente alterna de 50 periodos, a partir del momento en que el molde quedaba introducido en el dispositivo casi adiabático, lo que tenía lugar inmediatamente después del amasado.

El montaje en general, y en particular por lo que a la parte eléctrica se refiere, es el que se indica en el esquema de la figura 1.

Como puede apreciarse, permite efectuar la calefacción mediante corriente alterna (A) o continua (B), según la posición del conmutador (C) y, en el último caso, cambiar en un momento dado la polaridad de los electrodos, mediante el conmutador (D).

Un sistema de resistencias montadas en potenciómetro (E) permiten, por medio del voltímetro y el amperímetro, aplicar en cada caso una corriente de características dadas.

Un conmutador (F) análogo al (C) permite, bien sea el paso de la corriente a través de la probeta en el dispositivo casi adiabático (G), o bien efectuar la medición de la resistencia eléctrica de aquella en cualquier momento, por medio de un aparato adecuado (H) (medidor de resistencia Philips G.M. 4144, "Philoscop II"). Naturalmente que la resistencia eléctrica podrá medirse también hallando el cociente de las lecturas del voltímetro y el amperímetro.

La posibilidad de utilizar corriente continua, así como la de medir con exactitud el consumo de corriente en este caso,

mediante el culombímetro de cobre (I) introducido o no en el circuito según la posición de los interruptores (J) y (K), se tuvo en cuenta a efectos de otros estudios posteriores de cuyos resultados se dará cuenta en el momento oportuno.

El montaje consta además, de los interruptores auxiliares (L) y (M) y de los fusibles (N).

El termómetro (O) introducido en la probeta en la forma ya conocida (25), permite seguir el curso de la temperatura de la pasta de cemento durante cada experiencia.

Se llevaron a cabo dos series de ensayos en los que se mantuvo constante la intensidad a través de la probeta y la tensión aplicada a los electrodos, respectivamente.

Como quiera que la resistencia eléctrica de la pasta de cemento varía con el tiempo, para mantener la constancia, bien de la intensidad o bien de la tensión aplicada, fué preciso actuar sobre el potenciómetro E, sobre todo al final de cada experiencia, durante los últimos instantes del fraguado.

Al trabajar a intensidad constante se hicieron lecturas de la resistencia eléctrica R, de la tensión aplicada a los electrodos en cada instante V y de la temperatura T, a lo largo de cada ensayo, trazándose las curvas resistencia-tiempo $(R-t)_I$, tensión-tiempo $(V-t)_I$ y temperatura-tiempo $(T-t)_I$.

Análogamente, cuando se mantenía constante la tensión aplicada a los electrodos se hicieron lecturas de la resistencia eléctrica R, de la intensidad I que pasaba en cada momento a través de la probeta y de la temperatura T, trazándose además de las correspondientes curvas $(R-t)_V$ y $(T-t)_V$, las de intensidad-tiempo $(I-t)_V$.

La medida de la resistencia eléctrica R exigía, según se desprende del esquema de la figura 1 (comutador F), interrumpir el paso de la corriente a través de la probeta. Las interrupciones fueron, no obstante, lo más cortas posible, y su duración insignificante frente al tiempo total de actuación de la corriente. Es importante señalar esto, puesto que algunas consideraciones que habrán de hacerse en otro lugar tienen por dicha causa, así como por otras que también se señalarán, un carácter de aproximación, si bien son de utilidad, así como los resultados que de ellas se deducen, en la mayoría de las aplicaciones de tipo práctico.

No obstante, en la mayor parte de los casos, y con objeto de evitar las interrupciones del paso de la corriente y con ello los errores a que pudiera dar lugar, se tomó como valor de la resistencia R el cociente de las lecturas del voltímetro y del amperímetro.

El "Philoscop" se utilizó por mayor comodidad, en experiencias en que no se tomó en consideración para cálculos posteriores, el valor total del calor aplicado a la probeta en forma de energía eléctrica, durante el fraguado.

- - - -

IV - Resultados experimentales.

a) Curvas resistencia eléctrica-tiempo a intensidad constante: $(R-t)_I$

Como queda indicado estas curvas se trazaron con el cociente de la lectura variable del voltímetro y la lectura constante del amperímetro, mantenida esta última al actuar convenientemente.

temente sobre el potenciómetro E .

Para estudiar la marcha de estas curvas se hicieron pasar corrientes de intensidad comprendida entre 0,3 y 1 amperios a través de una masa de pasta contenida en un molde análogo a los utilizados en trabajos anteriores (25). Como electrodos sirvieron dos chapas de hierro de 4 x 2 cm., separados a una distancia de unos 4 cms.

Con estos datos puede calcularse, caso de interesar, la densidad de corriente y el consumo de energía por unidad de volumen de pasta contenida entre los electrodos.

Las curvas $(R-t)_I$ resultantes, así como los datos relativos a cada una de ellas y a los tiempos de fraguado hallados, se exponen en el gráfico y cuadro de la figura 2, en la cual pueden observarse los hechos que se ponen de relieve a continuación.

En general, a medida que la intensidad crece, las curvas se contraen, desplazándose hacia la izquierda los acusados mínimos que señalan el final del fraguado (curvas 1 a 10 de la figura 2).

Esta contracción y desplazamiento de las curvas $(R-t)_I$ es tal que, tanto los máximos característicos de ellas como los primeros mínimos, se van suavizando de modo progresivo y paulatino al crecer la intensidad, hasta que, para valores de ésta superiores a uno dado, desaparecen por completo.

En este caso, las curvas adoptan una forma de U en que las ramas anterior y posterior al fraguado están separadas por el único mínimo que en ellas aparece (curvas 11 a 15 de la figura 2).

De igual manera puede observarse que, a medida que crece el valor de la intensidad de la corriente, las curvas, si bien presentan en el origen una resistencia eléctrica dada, prácticamente común para todos los ensayos y probetas, tienden a situarse unas debajo de otras. Este hecho es tanto más fácilmente observable cuanto más se cuida de la constancia de otros factores experimentales secundarios que, al variar, pueden enmascararlo, haciendo que las curvas se entrecrucen. Los valores indicados en el cuadro de la figura 2 muestran que las intensidades crecientes influyen más en el final del fraguado que en el principio.

También se ve que el intervalo llega a hacerse prácticamente constante a partir de un cierto valor de la intensidad (curvas 7 a 15).

Si bien no se estudia más que un determinado tipo de cemento portland ordinario, es presumible que, por analogía con otros resultados anteriores comunes a diferentes cementos(2), el mayor o menor alcance de la acción de la intensidad en las curvas $(R-t)_I$ dependa, no sólo del valor de aquella, sino también del tipo de cemento empleado en los ensayos.

Ello equivaldría a decir que no todos los cementos experimentan la misma acción aceleradora en su fraguado, a causa de la calefacción por efecto Joule en unas condiciones dadas, de igual modo que no todos experimentan la misma aceleración por efecto del calor aplicado en cualquier otra forma (2).

La figura 3 indica la relación entre los principios (p), finales (f) e intervalos (i) de fraguado en relación con los valores de la intensidad, en nuestras condiciones experimentales.

De ella se deduce que el aumento de intensidad tiene una influencia menor en el principio que en el final del fraguado y, además, que esta influencia va disminuyendo a medida que la intensidad crece, dentro de los límites de valores estudiados.

En aquellas curvas en que se destaca la presencia de los puntos que acusan el principio y el final del fraguado (1 a 10 de la figura 2) es fácil apreciar que el intervalo de fraguado se acorta a medida que la intensidad empleada en la calefacción se hace mayor, como lo prueba también la curva i de la figura 3, trazada con las diferencias entre los valores correspondientes de las p y f.

A partir de un cierto valor de la intensidad el acortamiento del intervalo de fraguado es máximo y se mantiene prácticamente constante para intensidades mayores.

Los resultados expuestos, deducidos de las curvas $(R-t)_I$ coinciden con los obtenidos en trabajos previos (2) (7) en que se ha estudiado la influencia de la aplicación del calor en formas diferentes en el fraguado del cemento.

b) Curvas tensión aplicada-tiempo a intensidad constante $(V-t)_I$

El gráfico de la figura 4 muestra la marcha de estas curvas obtenidas con los datos de las experiencias que sirvieron para el trazado de las de la figura 2. En consecuencia, las curvas de ambas figuras se corresponden.

La figura 4 pone una vez más de relieve y, si cabe, con mayor claridad, los resultados ya consignados: 1); los mini-

mos y lo mismo los máximos de las curvas $(V-t)_I$ se desplazan de derecha a izquierda a medida que crece el valor de I . 2): a medida que I crece, las curvas $(V-t)_I$ van situadas unas por encima de otras en el gráfico, lo que indica que, teniendo en cuenta la resistencia eléctrica de la pasta y su evolución con el tiempo, la tensión precisa para hacer pasar una intensidad dada a través de la probeta es tanto mayor cuanto mayor es dicha intensidad, siguiendo la curva de tensión la marcha correspondiente a la curva de resistencia. 3): a medida que crece I se acusan menos los primeros mínimos y también los máximos de las curvas $(V-t)_I$ hasta que desaparecen a partir de un cierto valor de I . (curvas 11 a 15) (2). 4): lo mismo que se dice respecto del comienzo, final e intervalo de fraguado al tratar de las curvas $(R-t)_I$, puede decirse al tratar de las correspondientes $(V-t)_I$, tal como indica la figura 5 - en que se han representado en ordenadas las tensiones iniciales y en abscisas los correspondientes tiempos de principio, fin e intervalo de fraguado.

c) Curvas temperatura-tiempo a intensidad constante: $(T-t)_I$

En el gráfico de la figura 6 están representadas estas curvas. Puede observarse la diferencia de hábito entre las señaladas 1 a 5 y las restantes. Esta diferencia que, de no existir, daría a aquellas un curso análogo al de las indicadas con líneas de puntos (1' a 5'), hay que atribuirla al calor desprendido en el fraguado.

En efecto, cuando el calor desprendido al fraguar la pasta tiene un valor sensible frente al calor aportado a la misma por la corriente que se hace pasar a su través, el resultado es la

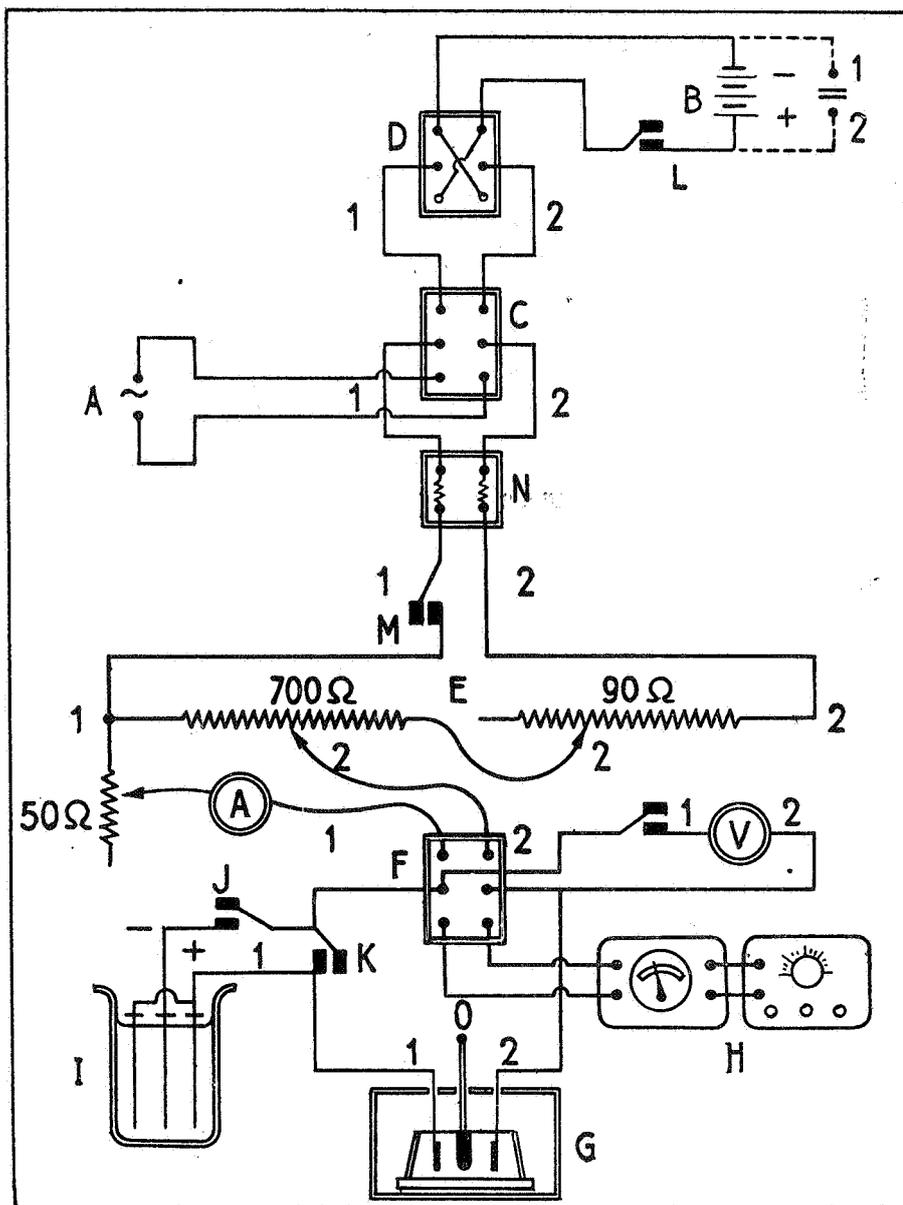


Fig. 1

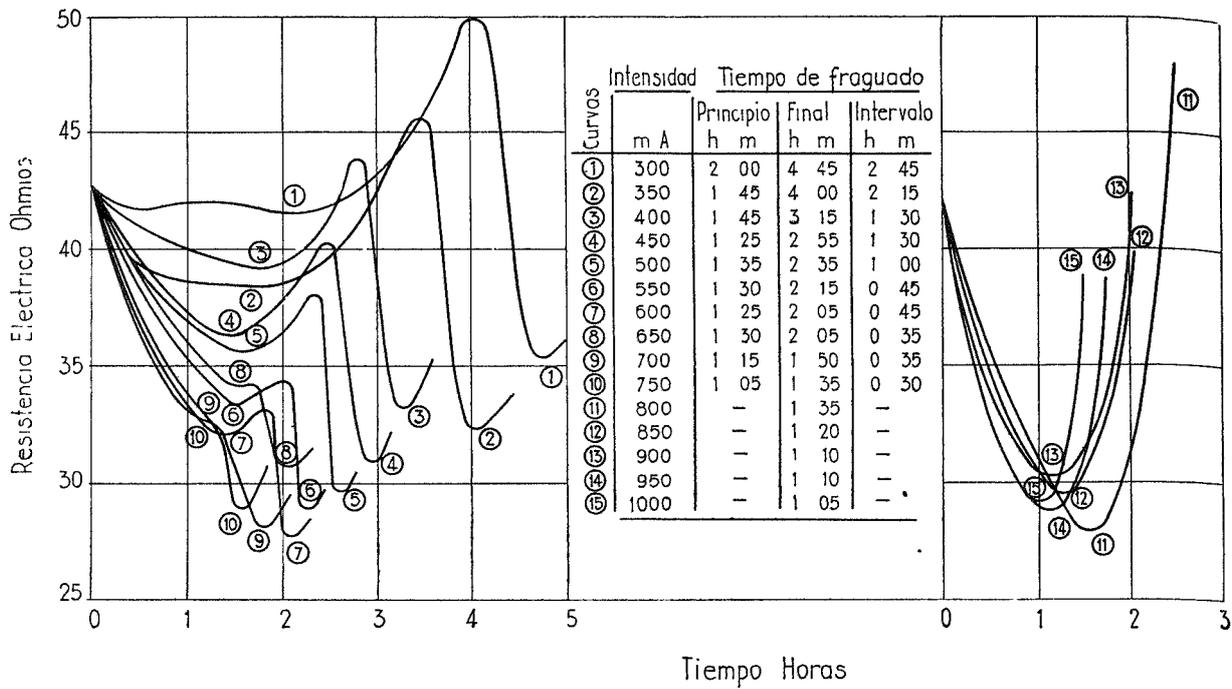


Fig. 2

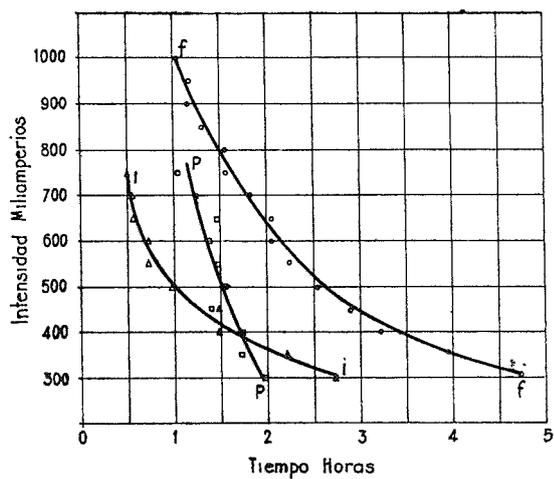


Fig. 3

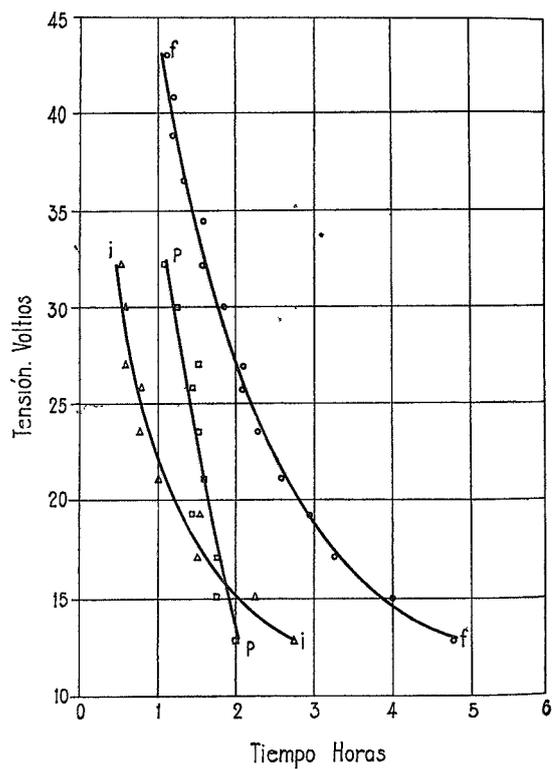


Fig. 5

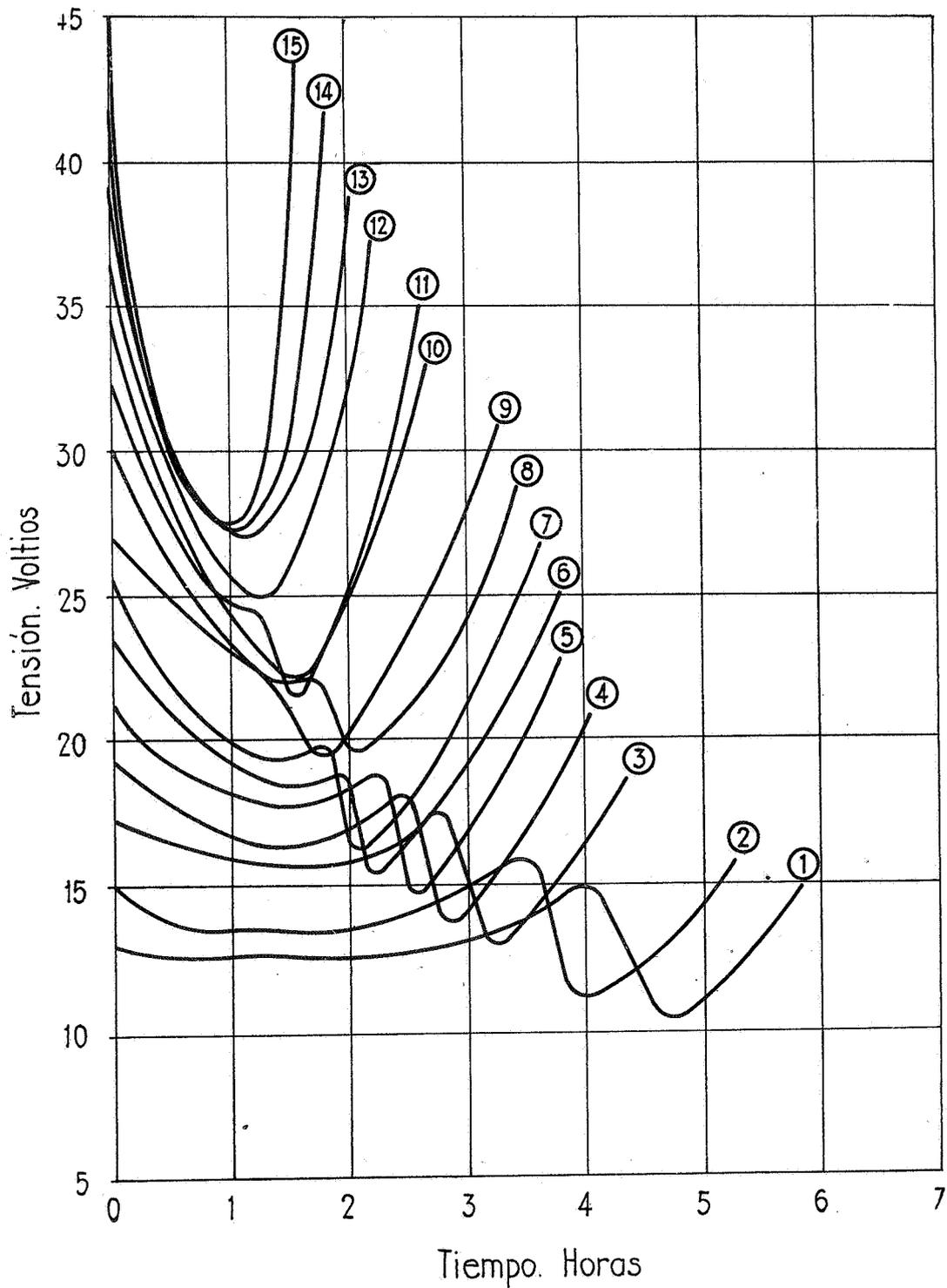


Fig. 4

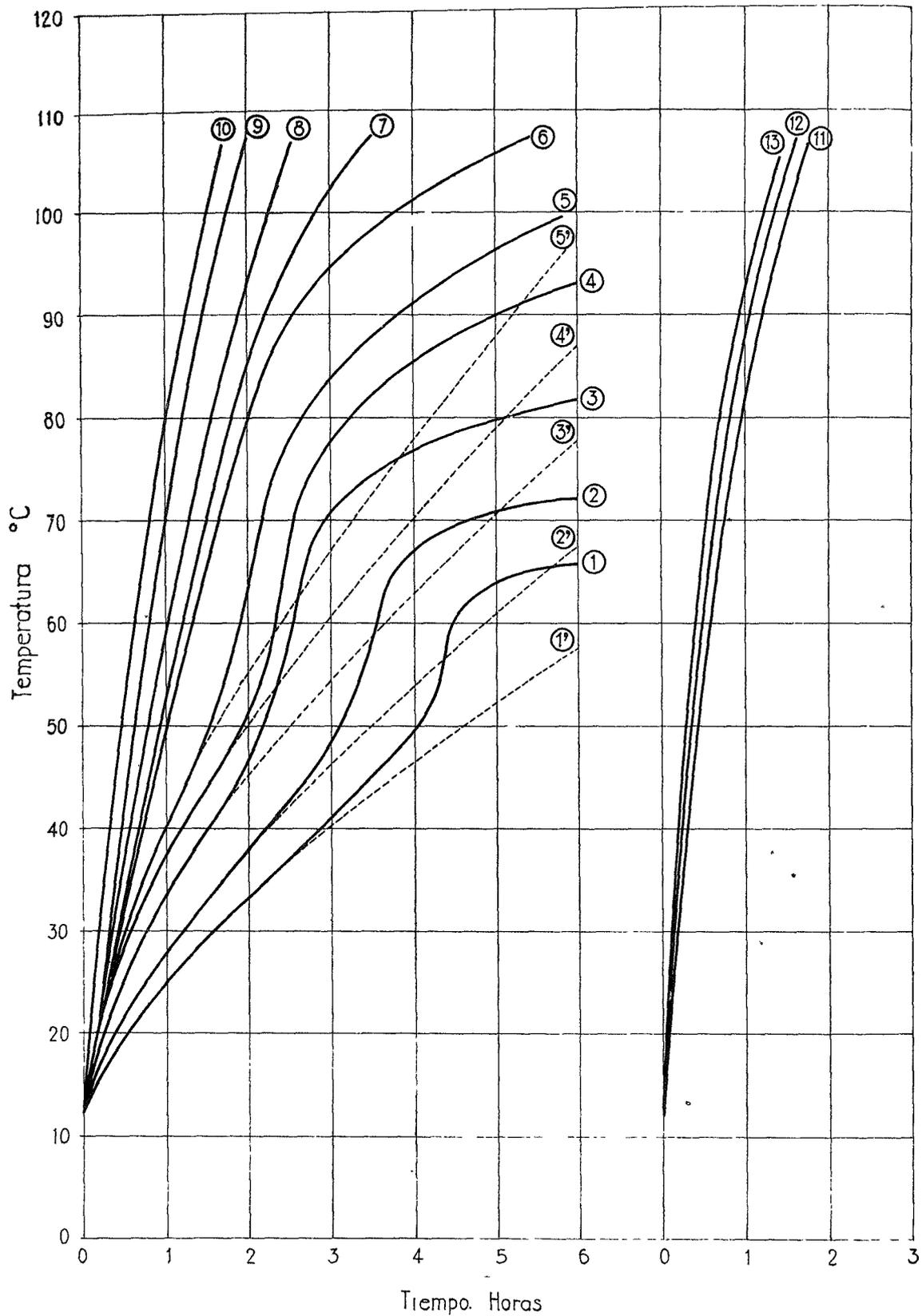


Fig. 6

aparición de un escalón en las curvas $(T-t)_I$, tal como se aprecia en la figura. Esto sucede en experiencias en que la intensidad de la corriente utilizada es pequeña y el efecto disminuye (el escalón se acusa menos), a medida que el valor de la intensidad crece, hasta que, a partir de un valor dado de la intensidad en adelante, dependiente de las condiciones experimentales, desaparece por completo (curvas 6 a 13).

El calor de hidratación se suma así al calor introducido en la probeta por efecto Joule y la aparición del escalón en algunas de las curvas $(T-t)_I$ tiene lugar precisamente entre el comienzo y el final del fraguado. Al terminar éste, cesa el desprendimiento de calor y por tanto el aumento de temperatura debido a la hidratación, y las curvas presentan, a partir del final de fraguado, una marcha normal, análoga a la inicial.

Por otra parte, la pendiente de las curvas $(T-t)_I$ es tanto mayor cuanto mayor es la intensidad aplicada en la experiencia correspondiente, como cumple a unas condiciones experimentales fijas.

A medida que crece la intensidad resulta más difícil señalar en las curvas $(T-t)_I$ los puntos que indican el principio y el final del fraguado y, a partir de un cierto valor de aquélla, ello resulta imposible. Esto demuestra lo ya expuesto en otros lugares (2) (27) acerca de la ventaja de las curvas $R-t$ sobre las $T-t$ para determinar el tiempo de fraguado en general, y de modo muy señalado en casos particulares en que las curvas $T-t$ vienen necesariamente deformadas por las mismas condiciones experimentales. Tal sucede al estudiar el fraguado de piezas sometidas a curado y conservación en cámaras y autoclaves a alta temperatura. Se

obtendrían en tal caso curvas como las de la figura 6, con o sin escalón, dependiendo de las condiciones experimentales y, particularmente, del valor y curso de la temperatura en el recinto. Resultaría en general difícil o imposible fijar los puntos que señalan el principio o el final del fraguado.

En las curvas de la figura 6 se han indicado estos puntos tal y como se deducen de las curvas $(R-t)_I$ y $(V-t)_I$ de las figuras 2 y 4. Como es fácil apreciar, a partir de la curva 5 en adelante, en la figura 6, no es posible situar en las curvas $(T-t)_I$ los puntos de comienzo ni aún siquiera los de final del fraguado. En las curvas 1 a 5 resulta aún bastante confuso el hacerlo.

d) Curvas resistencia eléctrica-tiempo a tensión constante: $(R-t)_V$

Como las curvas $(R-t)_I$ de la figura 2, las $(R-t)_V$ fueron trazadas con los valores del cociente de la tensión constante en cada experiencia y los de la intensidad señalada por el amperímetro a lo largo del proceso del fraguado. La tensión constante se mantuvo al actuar en forma adecuada sobre el potenciómetro E de la figura 1. Los valores de la tensión constante, así como la marcha de las curvas $(R-t)_V$ y los tiempos de principio, fin o intervalo de fraguado deducidos de ellas, están indicados en la figura 7.

Según se puede prever a partir de los resultados señalados en el apartado a), también en las curvas $(R-t)_V$ se desplazan hacia la izquierda los mínimos que señalan el final del fraguado, a medida que la tensión crece. De igual manera se hacen más difusos los máximos y primeros mínimos de las curvas, hasta el

punto de desaparecer por completo para valores de la tensión superiores a uno dado, obteniéndose en tal caso curvas $(R-t)_V$ en forma de U con un sólo mínimo (curvas 8 a 9 de la figura 7).

e) Curvas intensidad-tiempo a tensión constante: $(I-t)_V$

Los resultados expuestos en el apartado anterior se ven repetidos en la figura 8 en la que están representadas las curvas intensidad-tiempo a tensión constante. Estas fueron trazadas con las lecturas del amperímetro en las experiencias 1 a 9 del cuadro de la figura 7, a lo largo del proceso de fraguado.

Naturalmente, a los máximos y mínimos de las curvas $(R-t)_V$ corresponden respectivamente mínimos y máximos en las curvas $(I-t)_V$. Como es lógico, éstas se sitúan unas por encima de otras en la figura 8, puesto que corresponden a tensiones crecientes en el orden de los números.

Los finales del fraguado acusan más que los principios la influencia de la tensión aplicada, a medida que ésta se hace aumentar, tal como indican las figuras 9 y 10, comparables a las 5 y 3 respectivamente, y deducidas de los datos resultantes de las 7 y 8.

f) Curvas temperatura-tiempo a tensión constante: $(T-t)_V$

En las curvas $(T-t)_V$ de la figura 11 pueden observarse dos grupos con diferente hábito, lo mismo que sucede en las de la figura 6, si bien en forma no tan neta y acusada. La diferencia, como en aquel caso, se atribuye al valor alcanzado por -

el calor de fraguado frente al calor aportado por el efecto Joule en ambos grupos de curvas.

En el primero (curvas 1 a 5) el calor de fraguado es notable comparado con el suministrado por el paso de corriente, si bien su efecto resulta menor a medida que crece el valor de la tensión mantenida durante la experiencia. De no desprenderse calor al fraguar la pasta, las curvas seguirían una marcha análoga a la señalada con puntos (1' a 5').

En el segundo, el calor de fraguado es insignificante frente al producido por la corriente y no se acusa su influencia en la marcha de las curvas $(T-t)_V$.

Tanto más difícil resulta señalar en estas curvas el principio y el final del fraguado cuanto mayor fué la tensión aplicada y mantenida constante a lo largo de las experiencias que sirvieron para determinarlas. A partir de un cierto valor de la tensión, tal dificultad se traduce en una imposibilidad absoluta. En las curvas $(T-t)_V$ de la figura 11 están indicados, no obstante, los puntos de principio y final de fraguado, tal como se deducen de las curvas $(R-t)_V$ ó $(I-t)_V$ de las figuras 7 y 8.

Cuanto se indica en el apartado c) en relación con las curvas $(T-t)_I$ es aplicable a las $(T-t)_V$ y especialmente lo que se refiere a la imposibilidad de utilizar las curvas $T-t$ para determinar el tiempo de fraguado, cuando esto ha de hacerse en unas condiciones experimentales dadas: fraguado y endurecimiento en cámaras o autoclaves a temperatura elevada.

En tales casos, sin embargo, es posible utilizar con tal fin las curvas $(R-t)_I$, $(V-t)_I$, $(R-t)_V$ o $(I-t)_V$, como queda -

probado. Cualesquiera de ellas sirven en el caso de fraguado y curado acelerados mediante calefacción por efecto Joule, y las R-t en el caso de fraguado y curado acelerados por medio de otro sistema distinto de calefacción (2).

En el caso más general en que al calentar por efecto Joule varien tanto I como V, siempre es posible conocer el principio y final del fraguado a partir de las curvas R-t determinadas, bien mediante el cociente V/I de las lecturas del voltímetro y el amperímetro, o bien por medida directa con un óhmetro adecuado (Philips G. M. 4144 ("Philoscop II") Mullard Conductance bridge E 7566, etc.,).

- - - -

V - Conclusiones

Del presente estudio pueden deducirse las conclusiones siguientes:

1 - A constancia de las restantes condiciones experimentales, el curado acelerado del cemento mediante calefacción por efecto Joule es cualitativamente análogo y presenta las mismas características que el curado acelerado mediante aplicación de calor por cualquier otro procedimiento, en las circunstancias que quedan señaladas, es decir, empleando corriente alterna de 50 periodos en la forma expuesta.

2 - La técnica utilizada permite seguir el curso del fraguado en las condiciones de curado, pudiendo utilizarse para

ello los valores de las variables eléctricas que sirven para el control del curado eléctrico, cualesquiera que sean éstas y su variación con el tiempo.

3 - En idénticas condiciones, los datos de temperatura de las probetas durante el fraguado no permiten, en general, tener indicaciones precisas acerca de la marcha del mismo.

Hacemos patente nuestro agradecimiento al Sr. García de Arteaga, Diplomado del I. Q. S. por la parte que ha tomado en el desarrollo experimental de este trabajo.
