

Tratamientos térmicos del hormigón*

J. CALLEJA, Dr. en Ciencias Químicas

sinopsis

688 - 6

En este condensado de una publicación más extensa y detallada del I.E.T.c.c., se hacen destacar los principales conceptos y criterios que deben tenerse en cuenta al proyectar y aplicar esquemas de tratamientos térmicos para acelerar el fraguado y endurecimiento del hormigón, con vistas a la prefabricación de piezas y elementos estructurales de este material.

1 Parte general

La prefabricación de piezas o elementos estructurales de hormigón requiere una aceleración de los procesos de fraguado y de endurecimiento, si se tienen en cuenta los factores técnicos y económicos del problema. La productividad en sus diferentes aspectos, tales como el número de moldes utilizados, la producción unitaria por molde, la mano de obra en las diferentes etapas del proceso, etc., junto con el espacio de curado y la demora en la entrada en servicio de las piezas son los principales puntos a considerar.

Los métodos para acelerar el fraguado y el endurecimiento son de carácter vario y forman dos grandes grupos: el de los métodos de naturaleza química (empleo de cementos especiales o uso de aditivos aceleradores), y el de los métodos de naturaleza física (curado por tratamientos térmicos).

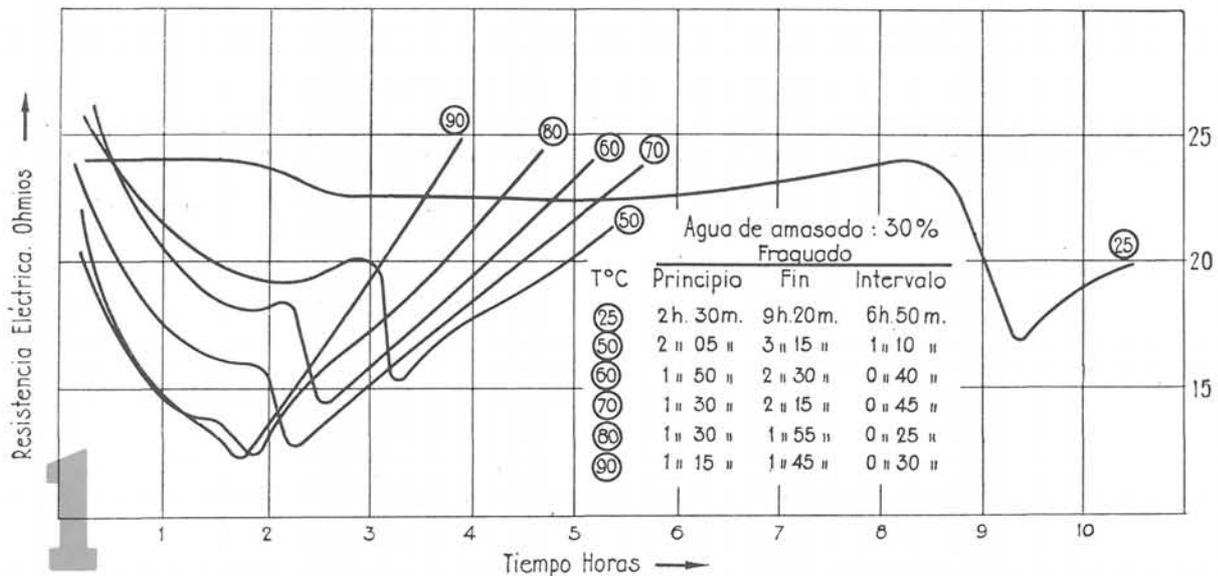
En cuanto al curado térmico se refiere, se han utilizado diferentes sistemas para transmitir calor a una masa de hormigón:

- I) calentamiento previo de los materiales (agua, áridos, cemento);
- II) inmersión en agua caliente;
- III) curado en vapor a presión ordinaria;
- IV) curado en vapor a alta presión (en autoclave);
- V) calentamiento eléctrico (por efecto Joule),

aparte de otros procedimientos más complejos y menos económicos, tales como la diatermia, la calefacción infrarroja y la calefacción por alta frecuencia.

El empleo de vapor a baja o a alta presión constituye el método más extendido de acelerar el fraguado y el endurecimiento en las instalaciones de prefabricación (1), mientras que el calentamiento por electricidad (2) se ha aplicado más al hormigón en masa de grandes obras, tales como presas, principalmente en la Unión Soviética y en el Japón.

* Condensado de una Monografía del Instituto "Eduardo Torroja" de la Construcción y del Cemento.



La humedad es un factor de la máxima importancia en los tratamientos térmicos, en relación con las resistencias mecánicas, con los cambios de volumen y con la fisuración y agrietamiento del hormigón. Las resistencias a edades cortas y más largas dependen considerablemente de las características técnicas de los procesos, y principalmente de la relación entre la temperatura y el tiempo.

El efecto del aumento de la temperatura en una masa de hormigón es acelerar tanto el fraguado como el endurecimiento. En cuanto al fraguado, tanto el principio como el final tienen lugar más pronto y, además, el intervalo de fraguado se acorta (3). En cuanto al endurecimiento, las resistencias a edades tempranas son mayores, mientras que las resistencias finales pueden ser mayores o menores, dependiendo de las relaciones entre la temperatura y el tiempo.

Los procedimientos mecánicos normales para establecer el tiempo de fraguado no sirven para determinar la influencia de la temperatura en el fraguado, pero otras técnicas especiales son particularmente aptas para este tipo de estudios (4). Las curvas resistencia eléctrica-tiempo de pastas de cemento presentan un mínimo que corresponde al final del fraguado. Este mínimo se desplaza hacia la izquierda al aumentar la temperatura de curado, tal como indica la figura 1 y esquemáticamente también la figura 2. La dependencia existente entre el principio, el final y el intervalo de fraguado por una parte, y la temperatura por otra, puede verse en la figura 3.

2 Tratamientos con vapor a baja presión

Los factores principales que influyen en un tratamiento con vapor a baja presión son los siguientes:

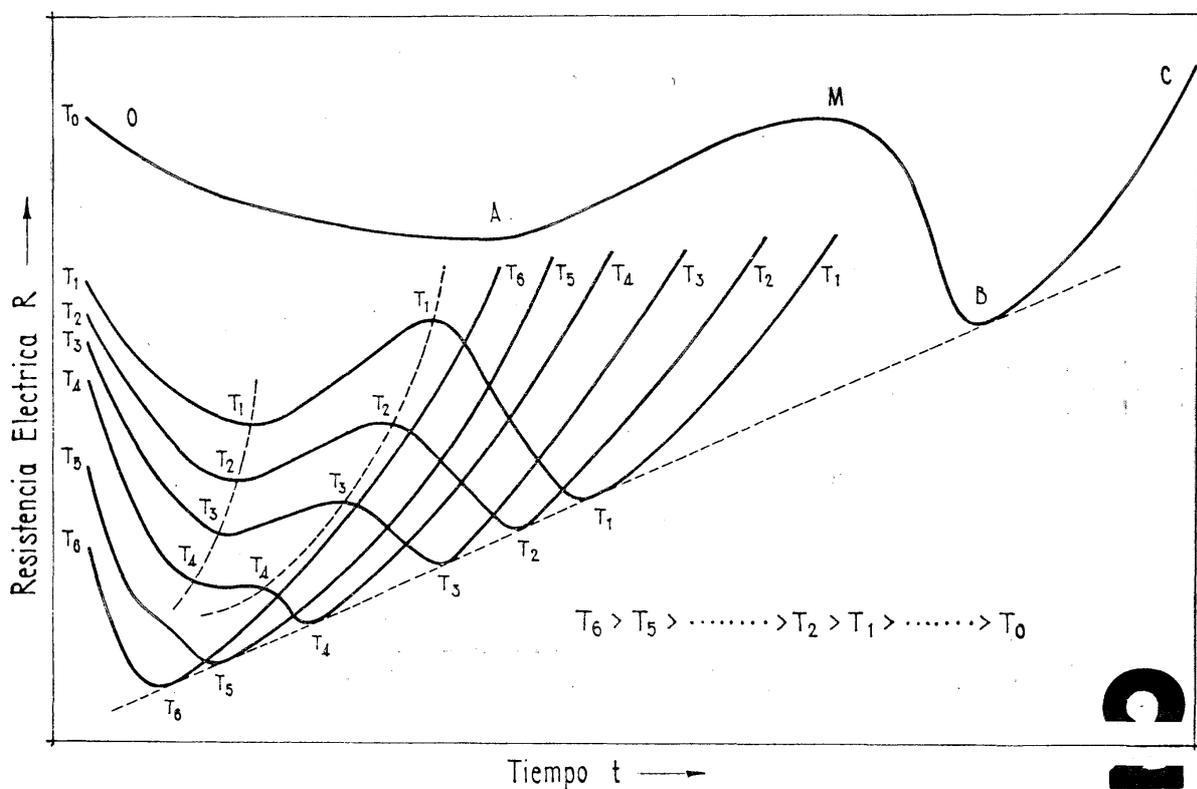
- el período preliminar de curado normal a temperatura ordinaria, desde el enmoldado del hormigón hasta el comienzo del tratamiento térmico;
- la velocidad de calefacción desde el comienzo del tratamiento hasta alcanzar la máxima temperatura;
- la máxima temperatura alcanzada;
- el período de permanencia a la máxima temperatura;
- la velocidad de enfriamiento desde el final del período de permanencia a la máxima temperatura hasta alcanzar la temperatura ordinaria.

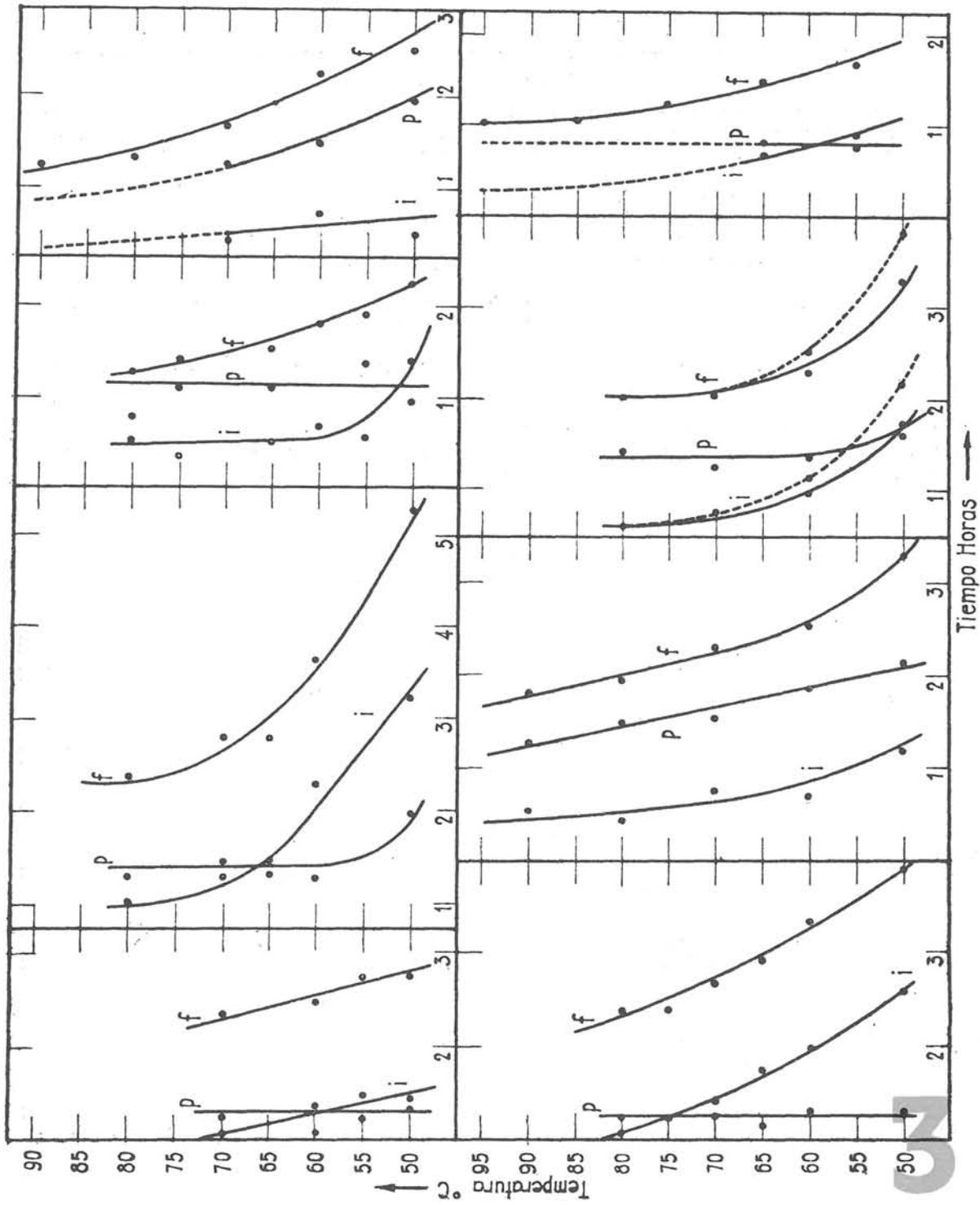
Estos períodos y etapas determinan el tiempo total del proceso completo y permiten establecer el programa de trabajo en cada caso. La figura 4 representa gráficamente varios de estos programas. Algunos detalles y valores particulares de tales períodos y etapas son los siguientes:

- 1) cuanto mayor es a), tanto mayores pueden ser b) y c) para alcanzar una resistencia final dada. Valores razonables para a) están comprendidos entre 1 y 3 horas;
- 2) cuanto mayor es b), tanto mayores son también las resistencias iniciales, pero las finales pueden quedar reducidas hasta un 50 a 70 por 100 de las correspondientes a un curado normal. Valores razonables para b) se hallan comprendidos entre 10°C/hr y 20°C/hr (12°C/hr a 15°C/hr);
- 3) los valores más frecuentes para la temperatura máxima se encuentran entre 70° y 90°C (75°-85°C);
- 4) cuanto mayor es d), mayores son también las resistencias finales, pero ello va en detrimento de la producción. Valores frecuentes para d) son 8, 10 y 12 horas;
- 5) cuanto menor es e), tanto mejores son las características generales de la producción. Valores razonables para e) se hallan comprendidos entre 5°C/hr y 20°C/hr (10°C/hr a 12°C/hr).

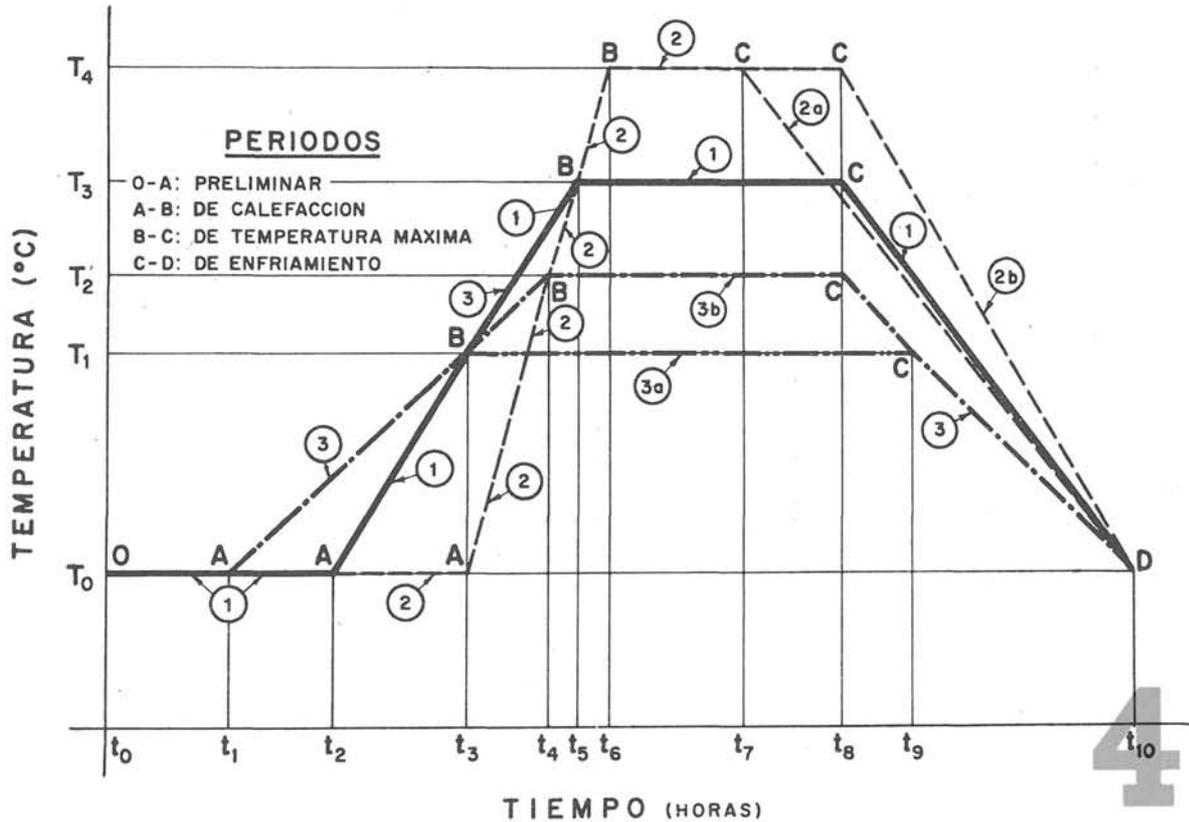
En cuanto al tiempo total de tratamiento, éste puede variar entre 8 y 24 horas, siendo valores normales los comprendidos entre 15 y 20 horas.

Otras variables que naturalmente influyen en los resultados de un tratamiento son la composición del hormigón, la naturaleza y granulometría de los áridos, el tipo, calidad y proporción de cemento, la relación agua/cemento, el grado de compactación del hormigón y la naturaleza y proporción de los aditivos eventualmente empleados.





TRATAMIENTOS CONTINUOS



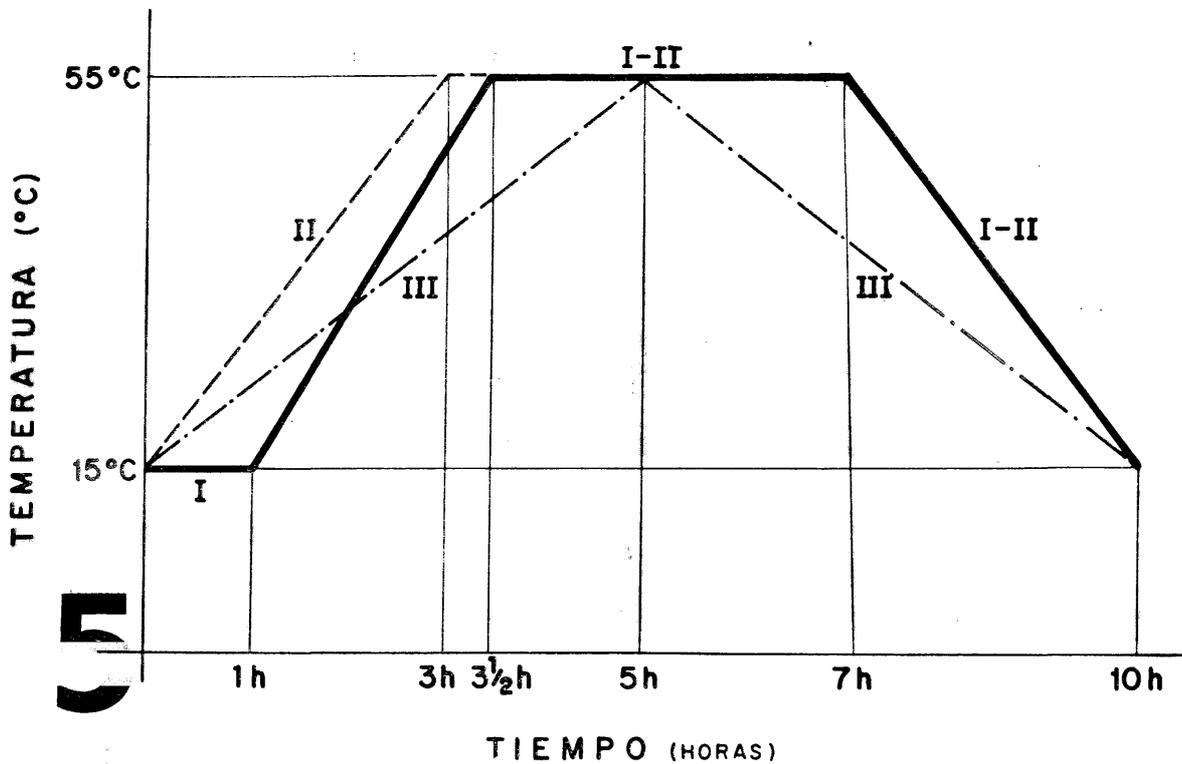
3 Tipos de tratamientos a baja presión

Los tratamientos a baja presión pueden ser continuos o discontinuos. Ejemplos de tratamientos continuos, sin cortes o regresiones en los periodos de calefacción y enfriamiento, son los representados gráficamente en el esquema de la figura 4. El ejemplo señalado con el número 1 muestra un tratamiento medio que puede servir como punto de partida para el establecimiento por vía experimental del proceso más conveniente en un caso particular, modificando de forma adecuada los valores de las variables implicadas. Valores medios y más frecuentes de tales variables pueden ser los indicados en el cuadro 1.

Cuadro 1

a)	2 hr	Tiempo total	19 hr
b)	20°C/hr	Período preliminar... ..	2 hr
c)	80°C	Período de calefacción... ..	3 hr
d)	8 hr	Período de máxima temp. ...	8 hr
e)	10°C/hr	Período de enfriamiento	6 hr
		Temperatura inicial y final ...	20°C

Las 5 horas restantes hasta las 24 horas de cada jornada se emplean en limpiar moldes, colocar armaduras, amasar y enmoldar el hormigón, así como en operaciones secundarias.



Como ejemplo real y práctico de los principios y reglas expuestos en el apartado 2, el I.E.T.c.c. ha llevado a cabo ensayos para determinar las condiciones óptimas de tratamiento para curar en agua caliente traviesas de ferrocarril hechas con hormigón. Condiciones fijadas para ello fueron una temperatura máxima de 55°C y un tiempo total de tratamiento de 10 horas. La figura 5 muestra tres procesos, de los cuales los numerados II y III pueden considerarse como extremos, siendo con mucho el número I, recomendado por el autor, el más adecuado para obtener las mejores resistencias del hormigón a cualquier edad (5).

Los tratamientos a baja presión pueden ser también discontinuos cuando el hormigón se somete a ciclos o etapas alternativas de calefacción y enfriamiento, o cuando se aplican sucesivamente distintos ritmos de calefacción. Ejemplos de tales tratamientos son los representados gráficamente en la figura 6. Algunos valores prácticos se dan en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 2

Período preliminar	0 hr
Primer período de calefacción desde 20° hasta 57°-60°C	10-15 min
Primer período de enfriamiento desde 57°-60° hasta 43°C	1 hr
Segundo período de calefacción desde 43° hasta 71°C	30 min
Segundo período de enfriamiento desde 71° hasta 57°C	60-75 min
Tercer período de calefacción desde 57° hasta 95°C	10 min
Período de permanencia a la máxima temperatura de 95°C	1 hr
Tercer período de enfriamiento desde 95°C hasta el final	3 hr
Tiempo total de tratamiento	7,5 hr

Cuadro 3

Período preliminar	0 hr
Primer período de calefacción desde 20° hasta 50°C ...	2 hr
Segundo período de calefacción desde 50° hasta 100°C.	4 hr
Velocidad de calefacción en el primer período	15°C/hr
Velocidad de calefacción en el segundo período	12,5°C/hr

4 Cálculo de la temperatura máxima

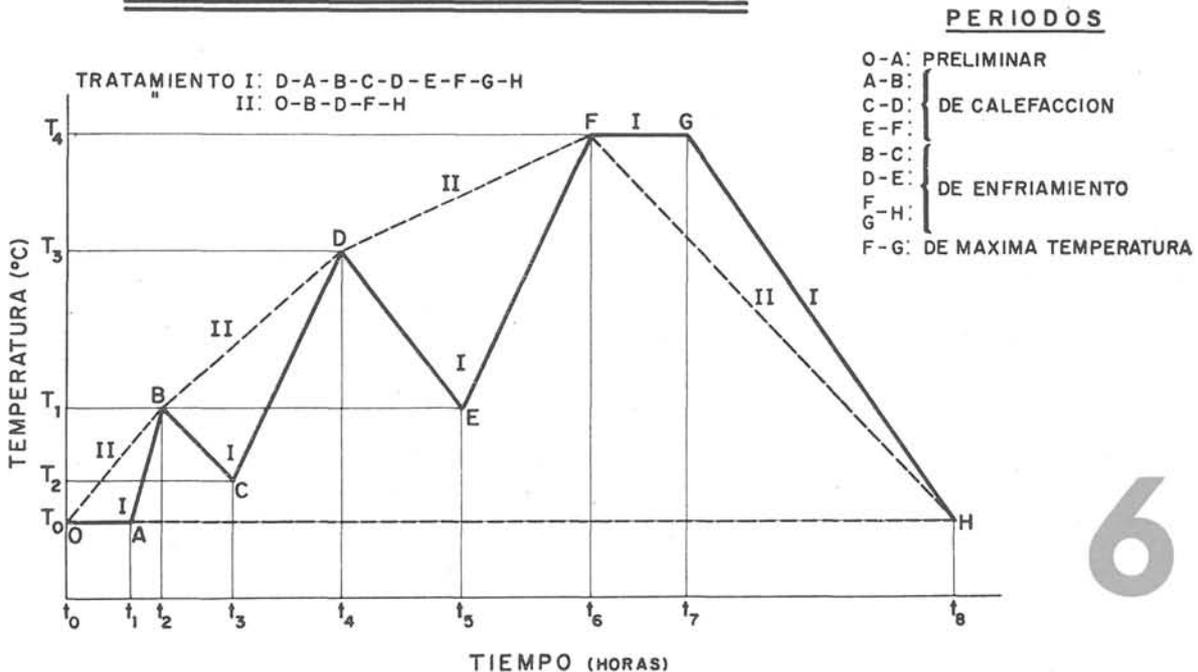
Un cálculo aproximado de la temperatura máxima en un tratamiento se basa en el concepto de «maduración» (o madurez) del hormigón, es decir, el producto (integral) de la temperatura de curado y el tiempo de tratamiento. Se basa también en la hipótesis de que a una maduración dada, cualesquiera que sean las temperaturas y los tiempos para obtenerla, corresponde una resistencia dada.

Un curado normal a una temperatura T_n (°C) durante un tiempo t_n (h) representa una maduración $M_n = T_n \cdot t_n$ (°C · h). El cálculo de la maduración M_i correspondiente a cualquiera de los tratamientos representados en la figura 4 es fácil, teniendo en cuenta los valores correspondientes de t_i y T_i , y admitiendo una variación lineal de T con t (las temperaturas medias durante los períodos de calefacción y enfriamiento son las medias aritméticas de las temperaturas inicial y final de los correspondientes períodos). M_i es de la forma $M_i = A + B \cdot T$, siendo A y B valores numéricos deducidos y T la temperatura máxima, incógnita del tratamiento. Según la hipótesis, se tiene:

$$M_n = T_n \cdot t_n = M_i = A + B \cdot T,$$

de donde se obtiene T . Este método permite calcular la temperatura máxima para obtener al final de un tratamiento dado y bien definido la resistencia correspondiente a cualquier edad, corta, media o larga de un curado normal a temperatura ordinaria.

TRATAMIENTOS DISCONTINUOS



5 Tratamientos a alta presión (autoclave)

La característica principal de estos tratamientos es que la llamada resistencia final del hormigón (es decir, la resistencia correspondiente a la edad de 1 año, por ejemplo) puede ser alcanzada en 24 horas. Los productos de hidratación en tales condiciones pueden ser distintos de los correspondientes a un curado normal ordinario, y pueden verificarse también reacciones puzolánicas. Las temperaturas de trabajo suelen estar comprendidas entre 120° y 160°C.

Las ventajas principales del tratamiento en autoclave son las siguientes:

- A) un endurecimiento más rápido;
- B) una retracción inicial menor y una menor retracción de secado y/o expansión;
- C) un mayor grado de sequedad en los productos;
- D) una mayor aptitud para tratar hormigones ligeros y porosos;
- E) una mayor resistencia al ataque por sulfatos (durabilidad).

Desventajas correspondientes son una menor adherencia entre las armaduras de acero y el hormigón y un mayor costo inicial de instalación del sistema.

6 Tratamientos electrotérmicos

Los tratamientos electrotérmicos del hormigón llevados a cabo por aplicación del «efecto Joule» han sido utilizados desde 1932, principalmente en la Unión Soviética (presas del Dnieper) y en el Japón.

En el hormigón en masa la técnica consiste en hacer pasar corriente a través del material, entre electrodos a fondo perdido en la masa del hormigón. El tiempo de tratamiento varía entre 6 y 18 hr (media, 10 hr), aumentando la temperatura desde 5°-20°C hasta 80°-85°C, bien sea rápidamente, o bien durante un período de 4-6 hr. Según sea el aumento de la temperatura, la máxima alcanzada puede mantenerse durante el resto del tiempo, o bien puede seguir un período de enfriamiento durante 3-4 hr. Se utiliza corriente alterna de baja tensión (220 V) y frecuencia industrial (50-60 períodos), no siendo necesario ningún control ni regulación de la corriente. De esta forma el consumo de energía es de 0,65-1,00 kW · h por metro cúbico de hormigón, para obtener un aumento de temperatura de 10-15°C/hr. Puede aumentarse la conductividad del hormigón mediante la adición de electrólitos de tipo salino, de naturaleza clorurada, tales como el cloruro sódico o el cloruro cálcico. Debe evitarse una rápida desecación del hormigón.

En el hormigón armado las armaduras de acero pueden servir de electrodos. En este caso es preciso evitar un calentamiento prolongado de las barras de acero para impedir la formación de tensiones y grietas en el hormigón. El aumento de temperatura debe ser uniforme, sin sobrepasar los 40°C, y el tratamiento debe comenzar 2 ó 3 horas después de vertido el hormigón. A este respecto se recomienda reducir en lo posible la cantidad de agua en el hormigón, así como determinar experimentalmente la influencia de la densidad de corriente y de la frecuencia. Las frecuencias de los suministros industriales ordinarios (50-60 períodos) ocasionan una ligera vibración de las armaduras que favorece la compactación del hormigón y la adherencia entre éste y el acero de las armaduras.

En el hormigón pretensado hay que tener en cuenta la posibilidad de una corrosión intercrystalina fisurante en los alambres de las armaduras, así como algunos efectos electrolíticos que pueden producir una cierta porosidad en el hormigón. Particularmente importante es la buena adherencia entre el hormigón y el acero, y todas las posibles causas que debiliten esta adherencia deben ser eliminadas. Las vigas pretensadas se pueden calentar por electricidad. La tensión V que debe utilizarse se puede calcular por la relación:

$$V = l \sqrt{\Delta T} \cdot \rho,$$

en la que l es la distancia entre los electrodos (en dm), ΔT es la velocidad de calefacción (en °C/hr) y ρ es la resistencia específica del hormigón. Normalmente $\Delta T = 10^\circ\text{C/hr}$ y ρ puede variar entre 500 y 2.000 ohms · cm, dependiendo de la relación agua/cemento, de la proporción y el tipo del cemento y, sobre todo, de la presencia de electrólitos en el hormigón. El rendimiento térmico depende a su vez de varios factores y no puede calcularse sino para casos particulares. Como ejemplo, un tratamiento durante 8 hr con alambres de armadura de 2,5 mm de diámetro requiere una potencia de 50 W por metro lineal de armadura, es decir, 150 W por metro lineal de viga con tres armaduras, equivalente a 1,2 kW · h por metro lineal de viga, lo que a su vez representa 180 kW por cada bancada de 12 vigas de 100 m de longitud. Estos datos, junto con la resistencia eléctrica del circuito deducida de la disposición de los alambres y con la resistividad del acero empleado (que hay que medir), permite calcular la tensión de alimentación, la cual es característica para cada bancada y para cada tiempo de tratamiento. La tensión debe corregirse por la temperatura, teniendo en cuenta que el voltaje aumenta en 0,6 por 100 por cada grado centígrado de aumento de la temperatura.

El factor económico en los tratamientos eléctricos depende de la disponibilidad y precio de la energía. Para hormigón estructural (en masa o armado) el costo del tratamiento puede representar, por término medio, de un 10 a un 15 por 100 del costo total de la estructura.

7 Consideraciones finales

El aspecto principal es que el rendimiento de un tratamiento o proceso determinado, tanto desde el punto de vista técnico como del económico, debe ser determinado experimentalmente para cada caso particular. Las resistencias a plazos cortos, medianos y largos deben compararse con las que resultan de un curado normal. A este respecto, la producción y los costos son los principales factores que hay que tener en cuenta.

Un control adecuado de los procesos, seguido de un idóneo control de la producción deben garantizar tanto los aspectos técnicos como los económicos de cualquier instalación para el curado térmico del hormigón.

Referencias

- (1) CALLEJA, J.: "Tratamientos térmicos del hormigón" (nota previa). *Materiales de Construcción*, I.E.T.c.c., número 85, 1958.
- (2) CALLEJA, J.: "Neue Verfahren zur Erforschung des Abbinde -und Erhärtungsvorganges der hydraulischen Bindemitteln. V. Beschleunigung des Abbindevorganges mittels Erwärmung durch Joule-Effekt". *Zement-Kalk-Gips*, 6/42, 282, 1953.
- (3) CALLEJA, J.: "Nuevas técnicas para el estudio del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos. IV: Influencia de la temperatura en el fraguado". *Revista de Ciencia Aplicada*, IV, 606, 1952.
- (4) CALLEJA, J.: "New techniques in the study of setting and hardening of hydraulic materials", I, II and III. *Journal of the American Concrete Institute*, 23, 525, 1952; 24, 329, 1952; 25, 249, 1953.
- (5) CALLEJA, J.: Trabajo no publicado: ensayos e investigaciones privadas. I.E.T.c.c., 1958.

Traitements thermiques du béton

J. Calleja, Dr. ès Sciences Chimiques.

Ce condensé d'une publication plus ample et plus détaillée de l'I.E.T.c.c. signale les principaux concepts et critères qu'il convient de respecter au moment de projeter et d'appliquer des schémas de traitements thermiques ayant pour but l'accélération de la prise et du durcissement du béton, en vue de la préfabrication de pièces et d'éléments de structure de ce matériau.

Thermal treatment of concrete

J. Calleja, Dr. chemistry.

This summary of a more extensive paper published by the I.E.T.c.c. emphasizes the main concepts and criteria that are to be taken into account when planning and utilising thermal treatment systems to speed up the setting and hardening of cement; mainly in connection with the manufacture of structural elements made of cement.

Thermische Behandlung des Betons

J. Calleja, Dr. der Chemie.

In dieser gedrängten Fassung einer umfangreicheren und ausführlicheren Veröffentlichung des I.E.T.c.c. werden die wesentlichsten Begriffe und Gesichtspunkte hervorgehoben, die bei der Planung und Anwendung von thermischen Behandlungsschemen zur Beschleunigung der Bindung und Erhärtung des Betons zu berücksichtigen sind, im Hinblick auf die Verfertigung von Teilen und Bauelementen aus diesem Material.