

tratamientos térmicos del hormigón

(2.ª parte)

J. CALLEJA, Dr. en Ciencias Químicas

3. ACELERACION TERMICA DEL ENDURECIMIENTO

La aceleración del endurecimiento, desde un punto de vista técnico, puede obedecer a una de dos finalidades: lograr unas resistencias mecánicas suficientes para el *desmoldeo* y *manejo* de las piezas prefabricadas, o bien conseguir las resistencias aceleradas precisas para la *inmediata entrada en servicio* de dichas piezas (después de un almacenamiento de veinticuatro a veintiocho horas). En el primer caso se ahorran moldes y se aumenta el rendimiento de los disponibles; en el segundo se ahorra espacio y tiempo de almacenamiento.

Los métodos principales de aportación de calor y humedad para acelerar el endurecimiento son:

- i) tratamiento con *agua caliente* por inmersión en balsas;
- ii) tratamiento con *vapor libre* a la presión ordinaria en cámaras;
- iii) tratamiento con *vapor a presión* en autoclaves;
- iv) tratamiento por *electricidad* ("efecto Joule").

Aparte de estos métodos pueden emplearse otros, como por ejemplo la *calefacción dieléctrica* (diatermia) por *rayos infrarrojos* y por *alta frecuencia*, a condición de tener en cuenta siempre el factor humedad.

Cuando estos procedimientos se aplican de modo correcto son prácticamente *equivalentes* en cuanto a resultados, es decir, desde un punto de vista *técnico*, aunque no lo sean desde un punto de vista *económico*. Ello es así, lo primero, porque los productos finales de la hidratación del cemento parecen ser *los mismos*, y, lo segundo, porque el costo del tratamiento depende del costo de la energía que se utilice, de la instalación necesaria y del propio tratamiento en sí.

No obstante, el método más elemental e inicialmente usado para acelerar térmicamente el fraguado y endurecimiento de los conglomerados fue el de *calentar los materiales*: agua de amasado, áridos e incluso cemento, antes de proceder a su mezcla. Este método se utiliza de preferencia en la confección de *hormigón en masa* y en el *hormigonado en tiempo* o en *climas fríos*.

También se ha recurrido a *calentar los recintos* de curado y almacenamiento.

El calentamiento de los materiales (a 30°-50°C) se ha aplicado con éxito, en combinación con el empleo de aceleradores químicos del endurecimiento, *en obra y en prefabricación*.

La aplicación de vapor en sus diversas formas se emplea más en la *prefabricación en taller*.

El calentamiento por “efecto Joule” se suele aplicar a hormigón en masa o armado, *en obra*.

En cuanto a los otros procedimientos citados, indudablemente han tenido hasta el presente mucho menor desarrollo, debido, sin duda, a su mayor costo de aplicación y tal vez también a causa de complicaciones técnicas.

3.1. Tratamientos térmicos con agua caliente.

Como se ha indicado en 1, los tratamientos aceleradores son *higrotérmicos*, pero pueden ser también *hidrotérmicos*.

El método más inmediato de conseguir y mantener una temperatura constante y un estado higrotérmico también constante, fáciles de controlar, parece ser, a primera vista, el de la balsa de inmersión, convenientemente aislada. Sin embargo, no es este el caso, ya que el cemento portland y algunos más son *poco sensibles* al tratamiento, y otros como el aluminoso y el sobresulfatado experimentan fuertes caídas de resistencia.

En todo caso este tratamiento puede producir *hinchamiento* y *expansiones* muy considerables, por el hecho de verificarse el curado en presencia de *agua en estado líquido*. En ello se basan algunos métodos de ensayo de expansión de pastas puras de cemento.

Esto hace que los cementos que hayan de ser utilizados en tratamientos térmicos deban ser ensayados desde el punto de vista de la expansión por dichos métodos.

Por todo ello el tratamiento con agua caliente carece de interés práctico, al menos en prefabricación.

3.2. Tratamientos térmicos con vapor libre.

3.2.1. ESTUDIO DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN.

El vapor de agua es el mejor aportador de *calor* y de *humedad*, simultáneamente, elementos indispensables para el *curado térmico (higrotérmico)*. Este curado, el más fácil de llevar a la práctica industrialmente, suele hacerse en *cámaras* o recintos aislados en los que se produce el vapor, o a los que se hace llegar éste. Están diseñadas y realizadas de tal modo que se evita la caída sobre las caras superiores de las piezas, de gotas líquidas formadas por la *condensación del vapor*. Estas condensaciones, por lo expuesto en 3.1., pueden producir expansiones, ablandamientos y descascarillados superficiales en las piezas tratadas.

Los tratamientos térmicos con vapor libre dan resultados mucho más regulares y reproducibles que los tratamientos con agua. Deben aplicarse a *cementos portland* o a conglomerantes a base de cemento portland, no siendo aconsejable su aplicación a cementos aluminosos ni sobresulfatados (véase 1).

Se suele tomar como índice de calidad de las piezas o elementos sometidos a tratamientos térmicos con vapor libre la *resistencia mecánica* de los mismos o, en su caso, de probetas idóneas confeccionadas con el mismo hormigón. Esta resistencia se compara con la de probetas análogas no sometidas al tratamiento, sino curadas en condiciones normales.

Esto permite comparar en ambos casos, no sólo las resistencias a corto plazo, sino también a plazos medianos o largos, pues sucede a veces que un tratamiento que eleva mucho las resistencias iniciales hace decaer muy sensiblemente las finales.

Por esta razón, las *resistencias finales* o la *disminución* de las mismas es, junto con el coste y la producción (productividad), uno de los factores a tener en cuenta en el tratamiento térmico con vapor libre.

A este respecto, las variables técnicas más importantes que deben ser consideradas, y cuyos *valores óptimos* deben determinarse y fijarse en cada caso, son:

- i) el *período inicial* o *preliminar* de curado normal, es decir, el *tiempo* que media entre el amasado y enmoldado del hormigón, y el comienzo de la aplicación del tratamiento térmico, propiamente dicho;
- ii) la *velocidad de calefacción* (°C/hora) desde el comienzo del tratamiento (al final del período inicial), hasta alcanzar una temperatura máxima;
- iii) el valor de la *temperatura máxima* alcanzada;
- iv) el *período de permanencia* o tiempo a que está sometido el hormigón a la *temperatura máxima*;
- v) la *velocidad de enfriamiento* (°C/hora) desde el final del período de permanencia a la máxima temperatura, hasta que se alcanza de nuevo la temperatura ambiente, o hasta que las piezas salen de la cámara o recinto de curado.

3.2.1.1. *Período inicial.*

Cuanto *mayor* es este *período inicial*, previo al tratamiento propiamente dicho, tanto *más admisibles* son las *mayores velocidades de calefacción*, ya dentro del tratamiento, y las *mayores temperaturas máximas* alcanzadas en el mismo, para conseguir unas resistencias finales dadas.

Así, en el cuadro 2 y en la figura 26 se puede ver que a períodos iniciales de t_1 , t_2 y t_3 horas (crecientes en este orden) corresponden velocidades de calefacción (pendientes o inclinaciones de las curvas) y temperaturas máximas alcanzadas de T_1 , ó T_2 , T_3 y T_4 , también crecientes en este orden.

Suelen ser frecuentes, y aún recomendables, las *demoras de una a tres horas* en el comienzo del tratamiento, jugando como factores determinantes las resistencias a plazos moderados y largos y la producción (número de piezas por jornada de trabajo). En función de esto cada caso requiere su solución particular, fijada por la experiencia, por lo que no es posible predecir a priori y con carácter general cuál de los cinco tratamientos del cuadro 2 y del gráfico de la figura 26 es el más conveniente.

CUADRO 2

CARACTERISTICAS	TRATAMIENTOS				
	1	2a	2b	3a	3b
PERIODO INICIAL (HORAS)	t_2	t_3	t_3	t_1	t_1
VELOCIDAD DE CALEFACCION (°C/HORA)	$\frac{T_3 - T_0}{t_5 - t_2}$	$\frac{T_4 - T_0}{t_6 - t_3}$	$\frac{T_4 - T_0}{t_6 - t_3}$	$\frac{T_1 - T_0}{t_3 - t_1}$	$\frac{T_2 - T_0}{t_4 - t_1}$
TEMPERATURA MAXIMA (°C)	T_3	T_4	T_4	T_1	T_2
PERIODO DE PERMANENCIA A LA TEMP. MAX. (HORAS)	$t_8 - t_5$	$t_7 - t_6$	$t_8 - t_6$	$t_9 - t_3$	$t_8 - t_4$
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO (°C/HORA)	$\frac{T_3 - T_0}{t_{10} - t_8}$	$\frac{T_4 - T_0}{t_{10} - t_7}$	$\frac{T_4 - T_0}{t_{10} - t_8}$	$\frac{T_1 - T_0}{t_{10} - t_9}$	$\frac{T_2 - T_0}{t_{10} - t_8}$
DURACION TOTAL (HORAS)	t_{10}	t_{10}	t_{10}	t_{10}	t_{10}

TRATAMIENTOS CONTINUOS

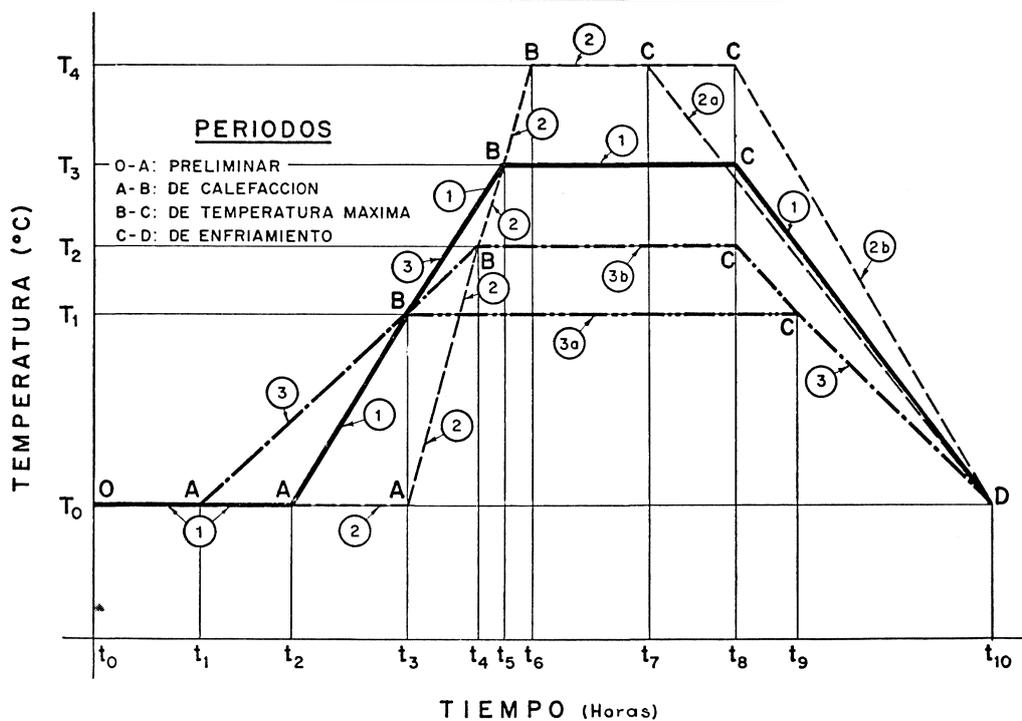


Fig. 26

3.2.1.2. Velocidad de calefacción.

Cuanto *mayor* es la *velocidad de calefacción* tanto *mayores* son las *resistencias a muy corto plazo* y, por lo mismo, tanto *más pronto* pueden desmoldarse las piezas, con la consiguiente ventaja para la producción.

Pero, en contrapartida, tanto *menores pueden* llegar a ser las *resistencias a plazos más largos*, en relación con las de un curado normal, hasta el punto de que la reducción puede llegar a ser a veces hasta del 30 al 50 %.

Por otra parte, según lo indicado en 3.2.1.1., *un período inicial más largo permite mayores velocidades de calefacción*, sin riesgo de reducciones tan notables de las resistencias. En todo caso, parece haber un *límite* en la velocidad de calefacción, el cual no se puede sobrepasar sin riesgo de tales reducciones. Este límite suele estar fijado por la naturaleza y calidad del cemento.

Hasta qué punto puede sacrificarse la resistencia mecánica a plazos medianos y largos en beneficio de un tratamiento más rápido y de una mayor producción, es cuestión a resolver en cada caso particular, sin que sea posible establecer normas de carácter general.

Así, en el cuadro 2 y en el gráfico de la figura 26, se dan tres velocidades de calefacción distintas para los tratamientos 3 (*a* y *b*), 1 y 2, crecientes en este orden. Los períodos iniciales y las temperaturas máximas están en consonancia con dichas velocidades, según lo ya indicado, y, sin embargo, no podría recomendarse uno de tales tratamientos como mejor, en un caso dado, si no es mediante una *experimentación real previa*.

Las velocidades de calefacción más frecuentemente utilizadas en los tratamientos con vapor libre suelen variar *entre 10° y 20°C/hora*, siendo valores normales los comprendidos *entre 12° y 15°C/hora*.

Según los ensayos americanos es recomendable una velocidad de calefacción de 15° a 20°C/hora, de manera que se consigan, como máximo, 80°C a las cuatro horas, y de 90° a 100°C a las cinco o seis horas. Una calefacción más gradual consiste en conseguir 50°C a las cuatro horas y 90°C a las seis horas.

En el caso de piezas armadas o pretensadas tampoco es conveniente una calefacción demasiado rápida, ya que perjudica a la buena adherencia entre las armaduras y el hormigón.

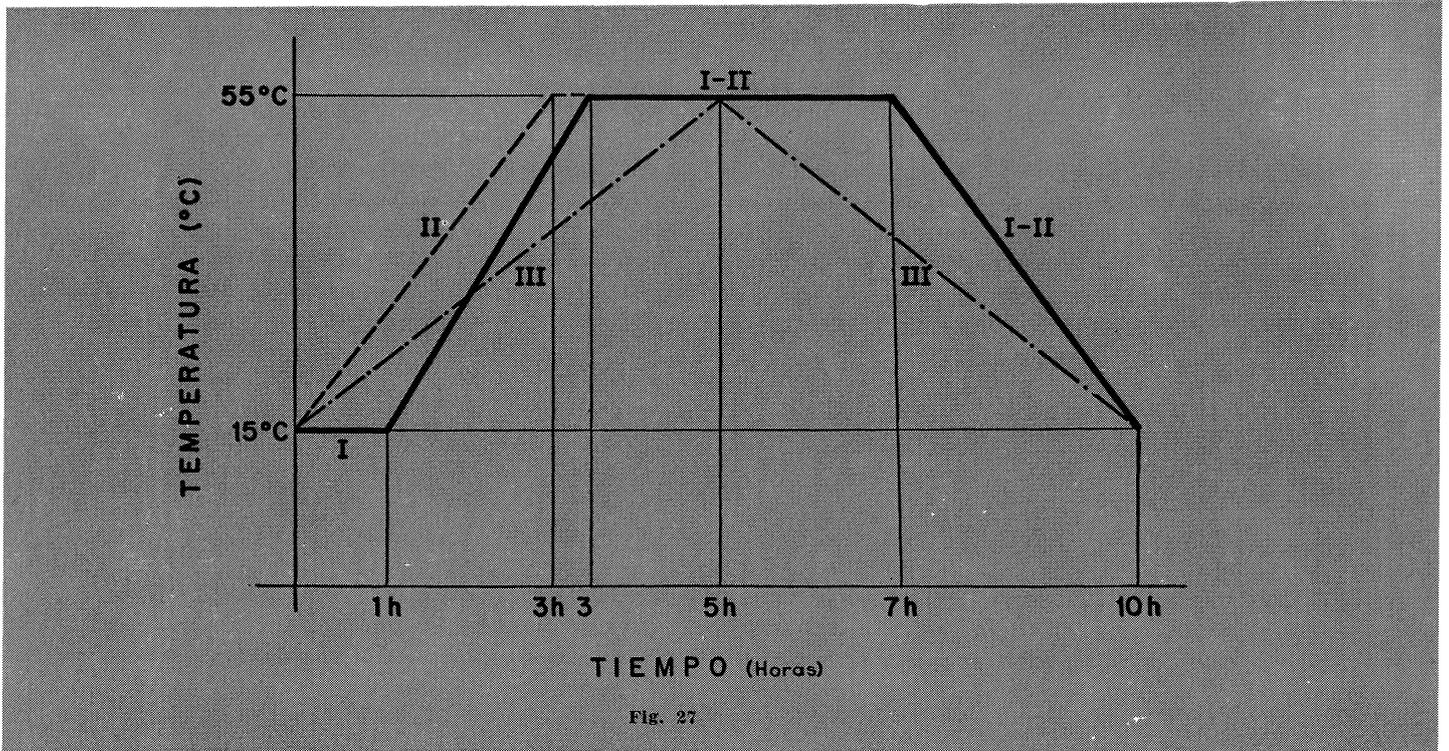
3.2.1.3. Temperatura máxima.

En los tratamientos con vapor libre, la *temperatura máxima* puede alcanzar, como máximo, naturalmente, los 100°C (caso que se puede asimilar al tratamiento 2 —*a* o *b*— del esquema de la figura 26).

Por el extremo inferior pueden fijarse *máximos comprendidos entre 50° y 60°C* (caso 3 —*a* o *b*— del esquema de la figura 26 y caso de la figura 27).

Los valores más frecuentes y normales son los comprendidos *entre 70° y 90°C* (o *entre 75° y 85°C*), como puede ser el caso del tratamiento 1 en el esquema de la figura 26. Temperaturas menores hacen el proceso menos rápido, y mayores pueden dar lugar a hinchamientos por desgasificación del agua de amasado.

En relación con lo indicado en 3.2.1.1. y 3.2.1.2., la *temperatura máxima* condiciona en cierta medida, tanto la *velocidad de calefacción* como la *extensión del periodo inicial*.



3.2.1.4. Período de permanencia a la temperatura máxima.

Una vez fijada la *temperatura máxima*, el *tiempo de permanencia* de las piezas a dicha temperatura *favorece*, en general, a las *resistencias a largo plazo*. Por otra parte, la *prolongación* de este período *eleva el costo* del tratamiento y *limita la producción* con una instalación dada. Al mismo tiempo, a igualdad de lo demás, ello implica una *mayor velocidad de enfriamiento* (tratamientos 2a y 2b en el esquema de la figura 26). Determinar cuál de ambos factores pesa más es cuestión a resolver en cada caso particular.

La *permanencia a la temperatura máxima* suele prolongarse a veces *hasta dieciséis horas*, siendo valores frecuentes *ocho, diez y doce horas*.

3.2.1.5. Velocidad de enfriamiento.

El *enfriamiento* de las piezas debe ser tan *gradual* o más que la calefacción. Han de evitarse los *choques térmicos bruscos* y las *variaciones de humedad súbitas*. Cuanto *más sostenido y lento* sea el enfriamiento *mejores* serán las características de todo tipo en las piezas tratadas. La única limitación es la impuesta, naturalmente, por los factores económicos.

Las velocidades de enfriamiento, según los casos, suelen variar *entre 5° y 20°C/hora*, siendo valores normales los comprendidos *entre 10° y 12°C/hora*.

Si la temperatura máxima ha sido *suficientemente alta* y el período de permanencia *suficientemente largo*, el hormigón adquiere una resistencia elevada (del orden del 80 % de la total en el caso del pretensado y del 30 % en el caso del armado), bastante para desmoldar. Un *secado* al enfriarse no perjudica entonces al hormigón, ni precisa éste de un *curado posterior en húmedo a la temperatura ambiente*. En tales casos, al final del tratamiento las piezas se suelen secar con aire caliente o vapor recalentado, ya que, cuanto *más secas, más resisten y menos retraen* (menos se agrietan y fisuran) al ser puestas en obra, aún frescas. Una resistencia mecánica de unos 50 kg/cm² a compresión permite desmoldar y manejar las piezas *con garantía de seguridad*. Pero si el tratamiento ha sido *breve y a baja temperatura*, no alcanzándose en tales condiciones más del 50 % de la resistencia del hormigón, *no puede contarse con tal garantía*.

3.2.1.6. Duración del tratamiento.

Como es lógico, la *duración total* del tratamiento es función de las *duraciones parciales* de cada una de las etapas señaladas. A su vez, una duración total prefijada determina las correspondientes a dichas etapas parciales, imponiendo una distribución del tiempo, la cual habrá de estar lo más posible en consonancia con los criterios antes expuestos.

La duración total puede variar, según los casos, entre *ocho y veinticuatro horas*, siendo duraciones normales las de *quince-veinte horas*.

3.2.1.7. Cálculo aproximado de la temperatura máxima del tratamiento.

Se basa este cálculo empírico en el concepto de *maduración M* del hormigón, entendiéndose por tal el producto de la temperatura de curado (*T* en °C) por la duración de este curado (*t* en horas): $T \cdot t$. Así, a un hormigón curado a 20°C (temperatura prácticamente constante) durante tres días (setenta y dos horas) le corresponde una maduración o *grado de maduración* de $20 \times 72 = 1.440$ (°C · h).

Si la temperatura no es constante, se entiende por maduración la integral o área de la curva temperatura-tiempo (*T-t*), expresadas ambas magnitudes en las citadas unidades. Para mayor sencillez se considera que la variación de temperatura es perfectamente lineal en los períodos de calefacción y enfriamiento, pudiéndose estimar en ellos una temperatura media —(inicial + final)/2—.

La hipótesis base del cálculo estriba en admitir que a *igualdad de grado de maduración* de un hormigón corresponde a éste *una misma resistencia*, independientemente de cómo se haya proporcionado dicha maduración.

Ejemplo: Supóngase que una viga pretensada curada a 15,5°C durante setenta y dos horas alcanza una resistencia de 450 kg/cm², necesaria para aplicar la tensión, y que se quiere lograr esa misma resistencia al cabo de un tratamiento de diecinueve horas según un curado del tipo 1, figura 26, con las siguientes características:

Temperatura inicial: 20°C.

Período preliminar: Dos horas.

Período de calefacción: Cuatro horas.

Temperatura máxima: *T*°C (incógnita).

Período de permanencia: Siete horas.

Período de enfriamiento: Seis horas.

Temperatura final: 20°C.

Duración total: Diecinueve horas.

Se tendrá:

Maduración en el curado normal a 20°C durante setenta y dos horas, M_n :

$$T \cdot t = M_n$$

$$15,5 \times 72 = 1.116 \text{ (}^\circ\text{C} \cdot \text{h)}.$$

Maduración en el tratamiento térmico previsto M_t :

$$T_i \cdot t_i + \frac{T_i + T_m}{2} \cdot t_c + T_m \cdot t_p + \frac{T_m + T_f}{2} \cdot t_e = M_t \text{ (I),}$$

donde:

T_i = temperatura inicial (°C).

t_i = tiempo de duración del período preliminar (horas).

T_m = temperatura máxima (°C) (incógnita T).

t_c = tiempo de calefacción (horas).

t_p = tiempo de permanencia a la máxima temperatura (horas).

T_f = temperatura final (generalmente igual a la inicial T_i) (°C).

t_e = tiempo de enfriamiento (horas).

M_t = maduración obtenida en el tratamiento.

$$20 \times 2 + \frac{(20 + T)}{2} \cdot 4 + T \cdot 7 + \frac{(T + 20)}{2} \cdot 6 = 140 + 12 \cdot T \text{ (}^\circ\text{C} \cdot \text{h)}.$$

Igualación de las maduraciones para lograr iguales resistencias:

$$M_n = M_t$$

$$1.116 = 140 + 12T$$

$$T = 81,3^\circ\text{C}.$$

La temperatura máxima del tratamiento resulta así ser de 81,3°C.

3.2.2. OTRAS VARIABLES.

Aparte de las señaladas, que son las de carácter puramente térmico, es preciso tener en cuenta otras relativas a los *materiales*, a la *dosificación*, a la ejecución y a las propias *piezas*. En cuanto a los materiales, tiene importancia el *tipo*, *clase* y *calidad del cemento* y la *naturaleza de los áridos*. En cuanto a la dosificación, es importante la *cantidad de cemento* y la relación *agua/cemento*. Por lo que hace a la *ejecución* (y también a la *com-*

posición del hormigón), el *grado de cerramiento* o *compacidad* del material tiene mucho que ver en los resultados del tratamiento. Finalmente, la *forma* y *dimensiones* de las piezas (espesores y relación superficie/volumen), influyen asimismo en los resultados.

Como compendio de esto puede decirse que la naturaleza del cemento y la de los áridos influye en los *valores óptimos* del *período preliminar* y de la *temperatura máxima*; que los tratamientos térmicos son *más eficaces* con masas más bien *secas* y *compactadas al máximo*; y que la eficacia parece ser *mayor* tratándose de masas de hormigón *más bien grandes*. Con relaciones agua/cemento elevadas es preciso intensificar el tratamiento para obtener un mismo resultado.

Por ello, las *adiciones fluidificantes* pueden coadyuvar a un mejor rendimiento de los tratamientos térmicos, pero debe tenerse en cuenta su posible *acción retardadora del fraguado* a efectos de *prolongar*, en compensación, el *período preliminar* del tratamiento.

Los cementos portland son los más adecuados para los tratamientos térmicos (tanto más cuanto mayor sea su grado de finura), a condición de que no contengan abundante *cal y magnesia libres*, cuya rápida hidratación daría lugar a hinchamientos, expansiones y pérdidas locales de resistencia. Por ello se recomienda un ensayo previo de expansión e hinchamiento con los cementos que se piense someter a tratamientos térmicos, en las mismas condiciones de éstos.

En cuanto a los *áridos*, los constituidos por arena, guijarro, grava o balasto, de *naturaleza silícica*, se comportan bien en tratamientos a temperaturas de 60°-65°C, mientras que los constituidos por escorias, piedra pómez y otros materiales ligeros con granulometría gruesa soportan bien tratamientos a temperaturas mayores.

3.2.3. TRATAMIENTOS CONTINUOS.

Los tratamientos con vapor libre pueden ser *continuos*, tales como los representados por las curvas esquemáticas de la figura 26, esto es, cuando *no hay interrupción* en los *períodos de calefacción* y *enfriamiento*.

Son innumerables los tratamientos que aparecen descritos en las publicaciones técnicas de la especialidad. Entre ellos se encuentran algunos representativos, los cuales se detallan en el cuadro 3. Con el fin de poder fijar algunas cifras, se establecen ciertas hipótesis que se indican en las observaciones de dicho cuadro.

A base de una serie más amplia de tratamientos como los esquematizados en el cuadro 3 o en un gráfico análogo al de la figura 26, se podrían establecer unos *valores medios más frecuentes* para cada uno de los períodos o etapas de que consta un tratamiento, obteniéndose un *tratamiento medio* que estaría representado por el señalado con el número 1 en el gráfico esquemático de la figura 26.

Este tratamiento medio puede y debe servir de punto de partida para establecer experimentalmente el tratamiento más conveniente a seguir en un caso particular dado, modificando de forma adecuada los valores de las variables consideradas en lo que precede.

Si del cuadro 3 hubieran de extraerse tales valores medios, éstos, reunidos, darían lugar al tratamiento medio detallado en el cuadro 4 (1 en el esquema de la figura 26).

Si la duración total del proceso es de veinticuatro horas, es decir, una jornada completa, las cinco horas restantes desde el final del período de enfriamiento (diecinueve horas) hay que suponer que se invierten en preparar las cámaras de curado, desmoldar, amasar y enmoldar, así como en otras operaciones accesorias.

CUADRO 3

C U R A D O

TRATAMIENTOS TERMICOS MEDIANTE VAPOR LIBRE PERIODOS Y DATOS REFERENTES A LOS MISMOS	P R O C E S O S							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1) PERIODO PRELIMINAR (DURACION EN HORAS) _____	0	2	2	0	0	0	2	2
2) VARIACION DE TEMPERATURA DURANTE 1) (EN °C) _____	0	20-27	0	0	0	0	0	0
3) VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO EN 1) (EN °C/HORA) _____	0	3,5	0	0	0	0	0	0
4) PERIODO DE CALEFACCION (DURACION EN HORAS) _____	3	1/2	4	4	4	4	3	3
5) VARIACION DE TEMPERATURA DURANTE 4) (EN °C) _____	20-74	27-76	20-93	20-74	20-76,5	20-82	20-82	20-93
6) VELOCIDAD DE CALEFACCION EN 4) (EN °C/HORA) _____	18	32	18	13,5	14	15,5	21	24
7) TEMPERATURA MAXIMA ALCANZADA (EN °C) _____	74	76	93	74	76,5	82	82	93
8) PERIODO DE MAXIMA TEMPERATURA (DURACION EN HORAS) _____	1	0	5-6	12	14 1/2	14	1	16
9) PERIODO DE ENFRIAMIENTO (DURACION EN HORAS) _____	8 3*	5	6		4	6	12	3
10) VARIACION DE TEMPERATURA DURANTE 9) (EN °C) _____	74-20	76-55	93-20					
11) VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN 9) (EN °C/HORAS) _____	18	4	12					
12) TEMPERATURA FINAL (EN °C) _____	20	55	20	ENFRIAMIENTO ESPONTANEO	ENFRIAMIENTO ESPONTANEO	ENFRIAMIENTO ESPONTANEO	ENFRIAMIENTO ESPONTANEO	ENFRIAMIENTO ESPONTANEO
13) DURACION TOTAL DEL PROCESO (EN HORAS) _____	15	8 1/2	17-18	16	24 1/2	24	18	22

OBSERVACIONES

* SECADO POSTERIOR AL ENFRIAMIENTO, CONSISTENTE EN UN TRATAMIENTO DURANTE 3 HORAS CON AIRE SECO Y CALIENTE. SE SUPONE QUE LA CALEFACCION Y EL ENFRIAMIENTO SON UNIFORMES. SALVO INDICACIONES EN CONTRARIO, SE ADMITE QUE LA TEMPERATURA INICIAL Y FINAL ES DE 20 °C.

CUADRO 4

DURACION DEL PERIODO PRELIMINAR _____	2 HORAS
VARIACION DE TEMPERATURA EN EL PERIODO PRELIMINAR _____	0 °C
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO EN EL PERIODO PRELIMINAR _____	0 °C
DURACION DEL PERIODO DE CALEFACCION _____	3 HORAS
VARIACION DE TEMPERATURA EN EL PERIODO DE CALEFACCION _____	20°-80 °C
VELOCIDAD DE CALEFACCION EN DICHO PERIODO _____	20 °C/HORA
TEMPERATURA MAXIMA ALCANZADA _____	80 °C
DURACION DEL PERIODO DE MAXIMA TEMPERATURA _____	8 HORAS
DURACION DEL PERIODO DE ENFRIAMIENTO _____	6 HORAS
VARIACION DE TEMPERATURA EN EL PERIODO DE ENFRIAMIENTO _____	80°-20 °C
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN DICHO PERIODO _____	10 °C/HORA
TEMPERATURA INICIAL Y FINAL _____	20 °C
DURACION TOTAL DEL PERIODO _____	19 HORAS

Un ejemplo práctico en que se confirman las conclusiones de los puntos 3.2.1.1. a 3.2.1.6. es el llevado a cabo en el I. E. T. c. c. hace unos años. Se trataba de unos ciertos elementos prefabricados, así como de probetas de ensayo hechas con el mismo hormigón que aquéllos. Unos y otras se sometían a cuatro tratamientos: el curado ordinario (a temperatura normal de unos 15°C y en ambiente húmedo) y otros tres que responden a las tres curvas I, II y III del gráfico de la figura 27. Las piezas se mantenían en una balsa cubierta y cerrada, fuera del agua, y el vapor se producía mediante calentadores de inmersión por resistencia eléctrica, siendo éste uno de los procedimientos que ordinariamente suelen aplicarse para tratamientos a temperatura relativamente baja y no muy prolongados.

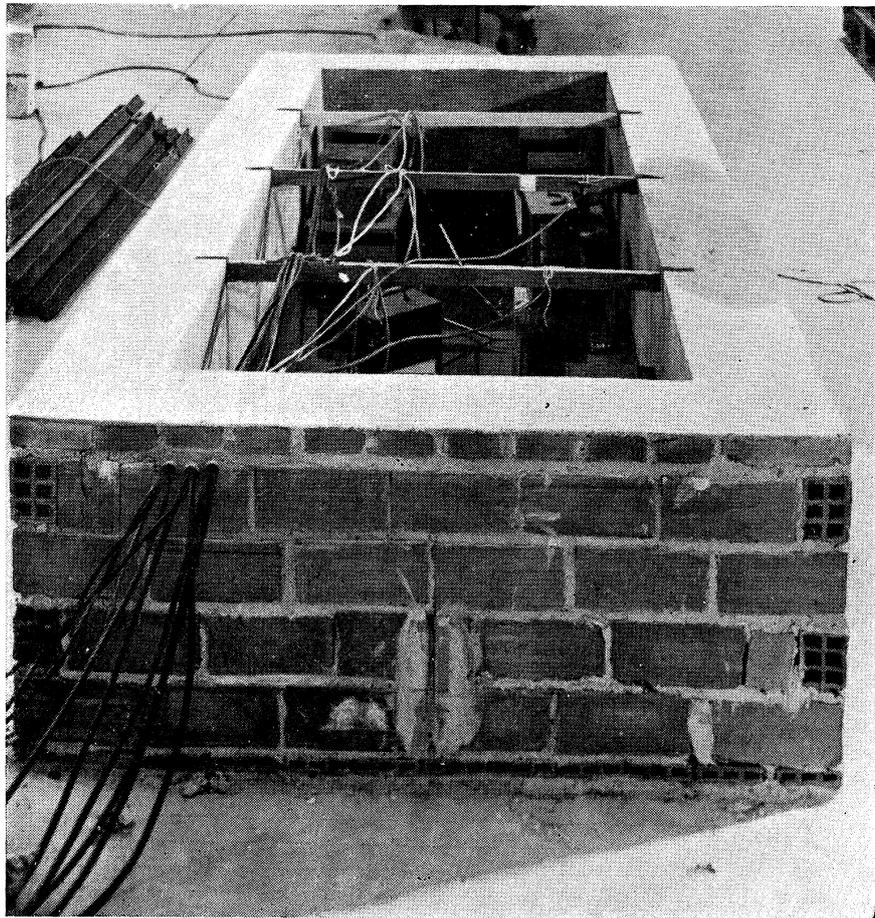


Fig. 28

A corto plazo (un día) las cargas de fisuración y de rotura fueron máximas para el tratamiento I, recomendado por el autor. Estas cargas fueron del orden de las conseguidas con los tratamientos II y III antes aplicados, a plazos más largos (siete días), y con el curado normal a plazos aún mayores (veintiocho días). Esto último prueba que los tra-

tamientos térmicos II y III en este caso no fueron los óptimos; figuraban como condiciones fijas obligadas una temperatura máxima del orden de 55°C y una duración total del tratamiento de diez horas.

Las balsas provisionales (abiertas) utilizadas, con los elementos de calefacción y de control de la temperatura y de la humedad, así como con las probetas de ensayo, son las que muestran las figuras 28 y 29.

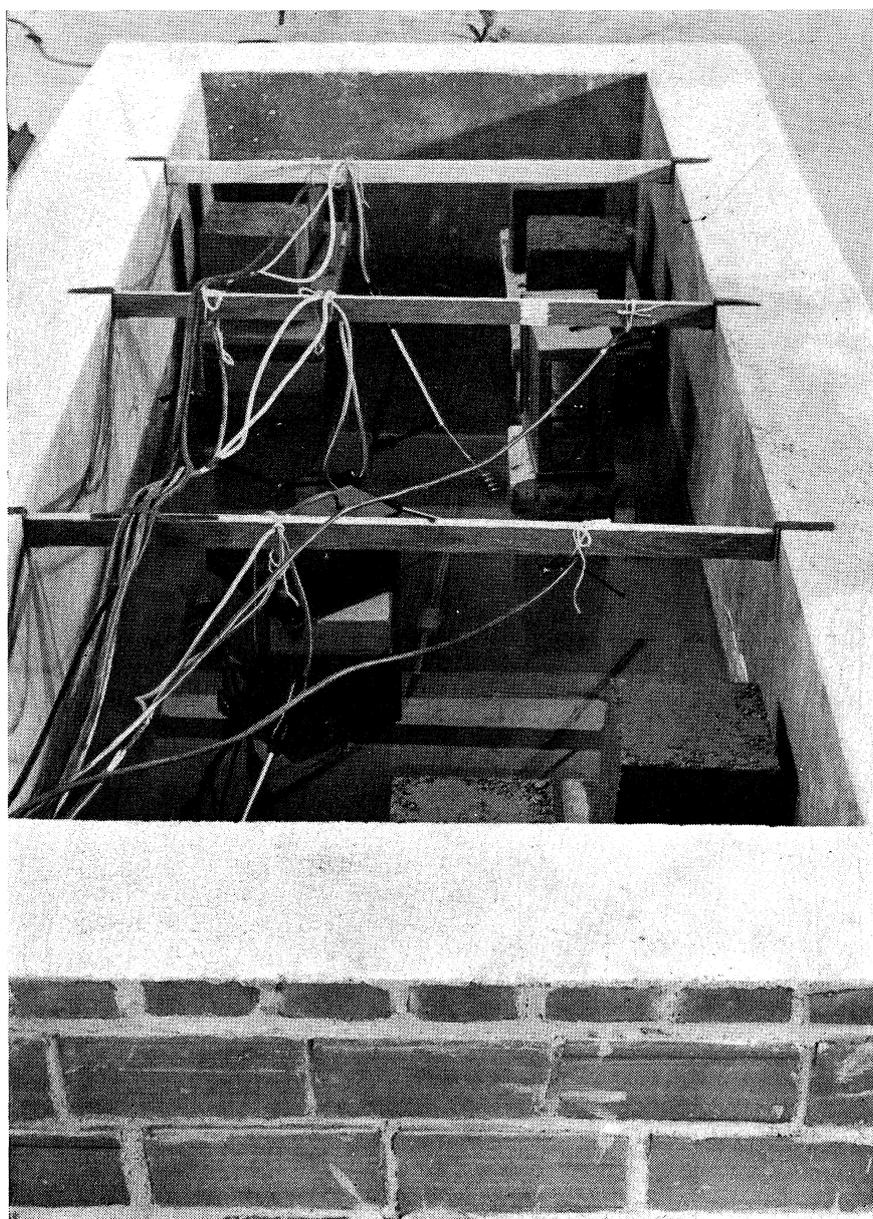
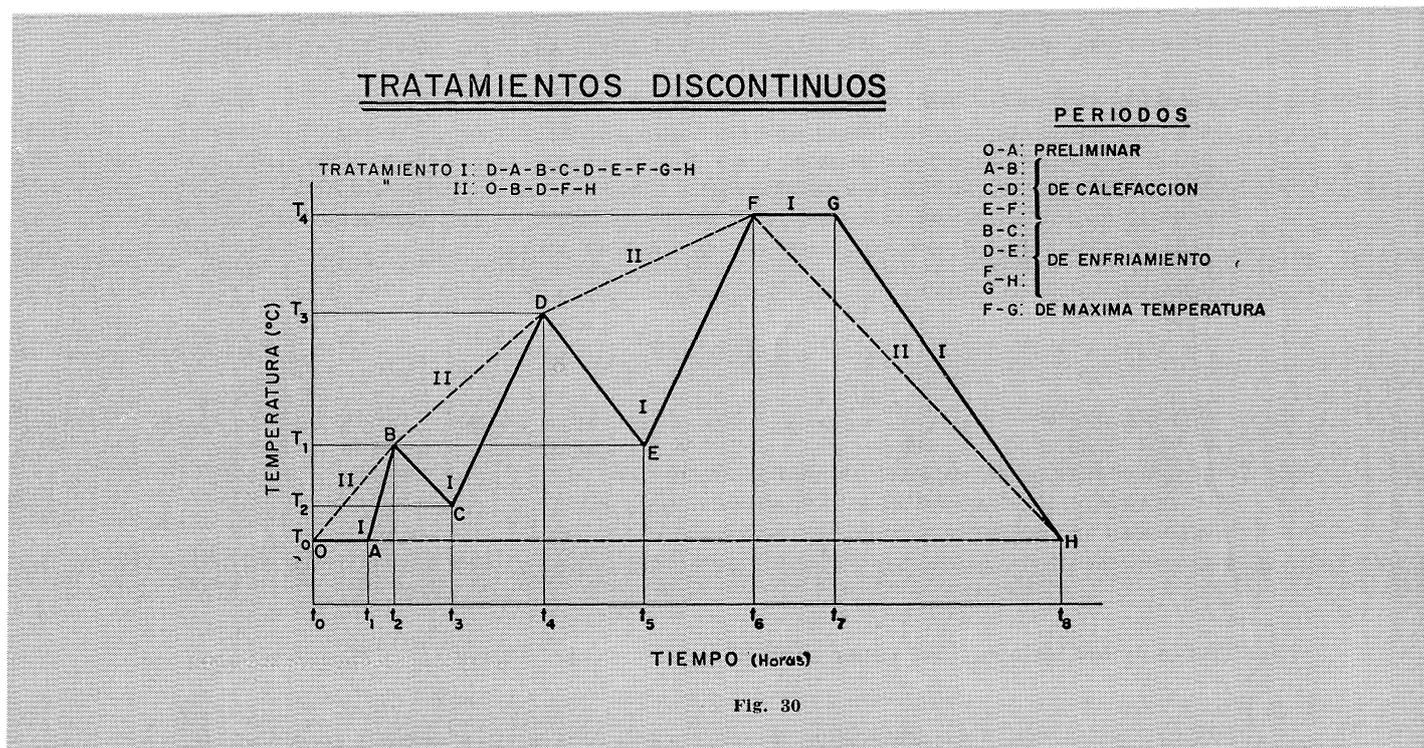


Fig. 29

Es interesante hacer notar que el tratamiento II dio resultados inferiores al tratamiento I, pese a que con él se confería al hormigón un mayor *grado de maduración*, como se aprecia en la figura 27, lo que prueba la importancia del *período preliminar*, única diferencia entre ambos tratamientos.



3.2.4. TRATAMIENTOS DISCONTINUOS.

Si hay alternancias de calefacciones y enfriamientos dentro de un mismo tratamiento, o si se dan diferentes ritmos de calefacción, el tratamiento se denomina *discontinuo* o *intermitente*.

Un esquema general de este tipo de tratamiento es el representado en el gráfico de la figura 30, por lo que se refiere a los tratamientos I y II.

En el tratamiento I (línea continua) se puede observar que las *velocidades de calefacción* son *decrecientes* en los períodos de calefacción primero (A-B), segundo (C-D) y tercero (E-F), y precisamente en este orden. La *velocidad de enfriamiento* en los respectivos períodos (B-C), (D-E) y (G-H) es la misma. Al final de cada período de calefacción o enfriamiento la temperatura es superior a la del período de calefacción o enfriamiento inmediatamente precedente.

En el tratamiento II (línea de trazos) las velocidades de calentamiento son *decrecientes* en los sucesivos períodos de calefacción (O-B), (B-D) y (D-F); la velocidad de enfriamiento (F-H) es del mismo orden que la de calentamiento en el primer período de calefacción.

Ejemplos prácticos reales de lo indicado son los tratamientos especificados en los cuadros 5 y 6.

CUADROS 5 y 6

PERIODO PRELIMINAR _____	0 HORAS
PRIMER PERIODO DE CALEFACCION, DE 20 a 57-60°C _____	10-15 MINUTOS
PRIMER PERIODO DE ENFRIAMIENTO, DE 57-60 a 43°C _____	1 HORA
SEGUNDO PERIODO DE CALEFACCION, DE 43 a 71°C _____	1/2 HORA
SEGUNDO PERIODO DE ENFRIAMIENTO, DE 71 a 57°C _____	1-1/2 HORAS
TERCER PERIODO DE CALEFACCION, DE 57 a 95°C _____	40 MINUTOS
PERIODO DE MAXIMA TEMPERATURA, a 95°C _____	1 HORA
TERCER PERIODO DE ENFRIAMIENTO, DESDE 95°C HASTA ABRIR LA CAMARA DE CURADO _____	3 HORAS
DURACION TOTAL DEL PROCESO _____	7 1/2 HORAS

* * * *

PERIODO PRELIMINAR _____	0 HORAS
PRIMER PERIODO DE CALEFACCION, DE 20 a 50°C _____	2 HORAS
SEGUNDO PERIODO DE CALEFACCION, DE 50 a 100°C _____	4 HORAS
VELOCIDAD DE CALEFACCION EN EL PRIMER PERIODO _____	15 °C/HORA
VELOCIDAD DE CALEFACCION EN EL SEGUNDO PERIODO _____	12,5°C/HORA

3.3. Tratamientos térmicos con vapor a presión (autoclave).

Las características más destacadas de un curado con vapor a presión en autoclave correctamente aplicado es que, al cabo del tratamiento (unas veinticuatro horas) se obtiene prácticamente la que pudiera denominarse *resistencia final del hormigón*. Así ha podido observarse, en tales casos, que las resistencias a un año son prácticamente las mismas que al final del tratamiento.

En relación con el curado normal sucede como con los restantes tipos de tratamientos: Las mejores resistencias finales son siempre las del hormigón curado en condiciones normales, salvo que el tratamiento en autoclave sea suficientemente largo y bien llevado.

La explicación de este hecho puede residir, por una parte, en la formación de silicatos cálcicos hidratados *distintos* a los obtenidos en el curado normal, y, por otra, a una *reacción* entre los finos silíceos del árido y el hidróxido cálcico liberado en la hidratación del cemento. Esta reacción sería de *tipo puzolánico* y acelerada (3.3.1)*. Las temperaturas de trabajo suelen oscilar entre 120° y 160°C, en un ambiente saturado de humedad y con exceso de agua.

* J. CALLEJA: "Apología de los Conglomerantes Puzolánicos". Conferencia pronunciada en la EXCO (Exposición Permanente de la Construcción - Ministerio de la Vivienda). Madrid, febrero de 1965. *Cemento y Hormigón*, núm. 386, 1965.

Las principales ventajas del tratamiento con vapor a presión son las siguientes:

- i) la *mayor rapidez* de endurecimiento;
- ii) la *menor retracción inicial* y las menores retracciones y expansiones *posteriores* por movimientos de humedad en las piezas; en general la *estabilización* de los productos empleados y la *estabilidad* de los obtenidos, aun cuando en condiciones ordinarias no sucediese así;
- iii) *el mayor grado de sequedad* de las piezas al final del tratamiento, respecto del curado con vapor libre;
- iv) la *mayor idoneidad* para tratamientos de *hormigones ligeros* y *porosos* y con áridos de naturaleza caliza;
- v) la *mayor resistencia a los sulfatos* de las piezas obtenidas.

Inconveniente paralelo a estas ventajas es el *costo* de la instalación y el del proceso, considerablemente mayores que en el caso del curado con vapor libre. El proceso a presión afecta desfavorablemente a la *adherencia* entre el hormigón y las armaduras.

3.3.1. EL PROBLEMA DE LOS HORMIGONES POROSOS TRATADOS CON VAPOR EN AUTOCLAVE.

Entre las ventajas de los tratamientos con vapor a presión, expuestas en 3.3, se cita la idoneidad para la obtención de prefabricados de hormigones *ligeros* y *porosos*. La diferencia entre unos y otros, en cuanto a esta denominación, es que los primeros son ligeros (de bajo peso específico) por estar constituidos por *áridos ligeros* de por sí, mientras que los segundos son porosos por estar "*espumados*", es decir, por contener una espuma homogénea uniformemente repartida en su masa. Estos últimos, constituidos por cemento y arena fina, además de la espuma, suelen ser más "*ligeros*" (menos densos) que los primeros, llegando a tener densidades del orden de 0,6 — 0,8 kilogramos/dm³.

La dificultad de estos hormigones, cuando se obtienen por curado al aire libre, reside en dos hechos: su *escasa resistencia* y su *gran retracción*.

La primera neutraliza en gran parte las buenas propiedades aislantes térmicas y acústicas de estos materiales, al no poderse fabricar en placas de tamaño grande, con el consiguiente ahorro de material y mano de obra, ya que fallan por los cantos y esquinas en el transporte.

La segunda, al no desaparecer, sino después de un secado completo, obligaría a un *secado artificial* o a un almacenamiento prolongado, soluciones antieconómicas ambas.

Por ello, la defensa de estos materiales está en los tratamientos con vapor en autoclave, por las circunstancias expuestas en 3.3.

La mayor rapidez de endurecimiento y, en definitiva, el aumento de la resistencia a causa del tratamiento, se incrementan con la utilización de *áridos silícicos activos de gran finura* (75 % menor de 60 micras y 100 % menor de 88 micras—tamiz de 4.900 mallas/cm²—) en una relación cemento: árido = 65:35 (*entre 60:40 y 70:30*).

Esta mejora de resistencias con relación al curado normal no se consigue con tratamientos con vapor libre, salvo en algún caso en que el árido es *escoria granulada de horno alto*.

Dicha mejora puede atribuirse, como se indicaba en 3.3, a otro tipo de *silicato cálcico hidratado*. El de *textura fibrosa*, con relación $0,8 < \text{CaO/SiO}_2 < 1,3$, puesto de relieve por las curvas de análisis térmico diferencial en los *tratamientos cortos*, se ve sus-

tituido en los *tratamientos prolongados* por un $S_3C_4H_3$ ($5SiO_2 \cdot 4CaO \cdot 5H_2O$) *laminar*, con diagrama de Rayos X correspondiente a la *tobermorita*, de donde se deduce que la transformación del silicato hidratado fibroso en tobermorita laminar proporciona una elevación de resistencias. La sílice cuarzosa fina *acelera* esta transformación que, por otra parte, no se verifica de manera total antes de un tiempo mínimo de *unas ocho horas* de tratamiento en autoclave.

En la rapidez del endurecimiento influye también la naturaleza del cemento, pero se observa que, contra lo que a primera vista pudiera parecer, *no se comportan mejor los de mayor grado de saturación de cal*, es decir, los de *mayor contenido de silicato tricálcico*. La explicación puede residir en el hecho de una participación mayor del silicato bicálcico en las condiciones del tratamiento.

La *menor retracción* debida al tratamiento puede obedecer a la *mayor fuerza de retención del agua capilar* (no unida químicamente), puesta de relieve por la mayor densidad de la pasta en el caso del curado normal. Esta diferente retracción da lugar a una diferente *estructura del gel*, que en el curado normal es más fácilmente *reversible*. En cambio, el gel de la pasta curada en autoclave es *más rígido y menos capilar, más lento en sus intercambios de humedad* con el ambiente, y de *volumen más estable*. También esto influye en las diferencias de resistencias, favorables al tratamiento en autoclave, como la transformación cristalina antes señalada influye asimismo en la retracción, disminuyéndola. Esto permite utilizar los elementos debidamente curados por vapor a presión a *las veinticuatro horas* de suministrados.

Los tratamientos requieren un curado normal previo de *quince a veinticuatro horas* y se prolongan *durante nueve horas*, a una presión de vapor de *ocho atmósferas*. A veces la presión se eleva *hasta 10 ó 12 atmósferas* y el tiempo se reduce a *doce horas*.

Los endurecimientos *demasiado rápidos* por tratamiento en autoclave, pueden dar lugar a *materiales heterogéneos*, porque en un tal proceso muy probablemente se dan siempre anomalías. Entre éstas son frecuentes los *hinchamientos expansivos de origen químico* (transformaciones de los sulfoaluminatos cálcicos) o *físico* (dilatación del aire contenido en el hormigón o disuelto en el agua). A tal efecto se recomienda el empleo de cementos *de bajo contenido de aluminato tricálcico*.

En las piezas de hormigón armado sometidas a tratamiento con vapor a presión, es preciso tener en cuenta la desfavorable influencia que ésta ejerce en la *adherencia* de las armaduras, la cual *queda reducida al 30-50 %* del valor que alcanzaría en un curado normal. No es práctica usual la de someter piezas armadas a un tratamiento en autoclave.

3.4. Tratamientos térmicos por calefacción eléctrica. =====

Como se indicó en 1, el calentamiento por “efecto Joule” se ha aplicado a hormigón en masa o armado, *en obra*.

La cantidad de calor engendrada al paso de una corriente de intensidad I por un conductor de resistencia específica ρ , con una longitud l y una sección s es:

$$Q = K \cdot \rho \cdot \frac{l}{s} \cdot I^2,$$

$$Q = k \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{s}{l} \cdot E^2,$$

siendo:

Q = cantidad de calor en calorías.

k = equivalente calorífico de la corriente, en vatios \times hora/calorías (860).

ρ = resistencia específica, en ohmios \times centímetro.

l = longitud de la sección conductora, en centímetros.

s = sección conductora, en centímetros cuadrados.

I = intensidad de la corriente, en amperios.

E = tensión de la corriente, en voltios.

Los primeros intentos de *tratamiento electrotérmico* del hormigón se remontan a 1932, habiéndose desarrollado esta técnica en gran escala en la Unión Soviética, con el nombre de "electro-hormigón", con motivo del hormigonado en invierno de las grandes presas del Dnieper.

En Japón también se han desarrollado con posterioridad los tratamientos electrotérmicos del hormigón, hasta el punto de que estos tratamientos *están prescritos* en dicho país.

En el caso del hormigón en masa, y con electrodos "a fondo perdido", la técnica consiste a grandes rasgos en hacer pasar corriente a través de la masa de hormigón recién vertida en el encofrado, durante un período de *seis a dieciocho horas* (por término medio *diez horas*), alcanzándose rápidamente una temperatura de 80°C que se mantiene después durante el tiempo indicado.

El consumo de energía viene a ser de $0,65$ a $1 \text{ kW} \times \text{hora por metro cúbico de hormigón}$, para obtener una elevación de temperatura de 10° a 15°C/hora , partiendo de temperaturas iniciales de 5° a 20°C y alcanzando una temperatura final de 85°C al cabo de *cuatro a seis horas*. El enfriamiento suele durar de *tres a cuatro horas*, habiéndose puesto de manifiesto la gran importancia que tiene en los resultados.

En estas condiciones suelen obtenerse resistencias análogas a las logradas al cabo de *diez días de curado normal*, o al cabo de *dos días de conservación en atmósfera de vapor a 70° - 80°C* .

Se suele utilizar *corriente alterna de baja tensión* (220 V) y frecuencia industrial, aunque en algún caso se haya ensayado la corriente continua y los efectos de la polaridad. Puede trabajarse a *tensión constante*, con lo que no es preciso efectuar ninguna regulación de la corriente.

Con objeto de hacer *más conductor* al hormigón se han utilizado *adiciones de tipo salino* (cloruro sódico y cloruro cálcico) y en relación con ellas y con el tratamiento electrotérmico en general se han estudiado problemas de *agrietamientos, adherencias de armaduras, corrosión de armaduras y desecaciones*. Estas últimas, muy de tener en cuenta, se pueden evitar en gran parte recubriendo el hormigón con una capa de agua de un centímetro de espesor, lo que se ha efectuado en la preparación de suelos de cámaras frigoríficas, en las que necesariamente la temperatura de curado es muy baja en las condiciones de servicio. Es importante insistir en que si no se evita al máximo la desecación rápida, la caída de resistencias a plazos moderados y largos puede ser muy considerable.

En el caso del *hormigón armado* pueden actuar como electrodos las propias armaduras. En este caso, conviene señalar como precauciones a adoptar, las siguientes: a) evitar

un calentamiento prolongado de las armaduras; b) no sobrepasar los 40°C; c) procurar que el aumento de temperaturas sea *uniforme* en toda la masa; d) comenzar el tratamiento a las dos o tres horas de vertido el hormigón; e) hacer que las temperaturas *inicial* y *final* del tratamiento sean lo más *próximas* posible.

Para conseguir esto se recomienda *reducir la cantidad de agua* del hormigón, utilizar *tensiones bajas* y estudiar la influencia de la *densidad de corriente* (A/cm²) y de la frecuencia. El valor óptimo para ésta suele ser muy próximo al de la corriente industrial (50-60 períodos). A esta frecuencia se producen ligeras *vibraciones de las armaduras* que favorecen la *compactación* del hormigón y la *adherencia*. El calentamiento de las armaduras dilata a éstas y al enfriarse después se contraen y producen una cierta *tensión* en el revestimiento, lo cual *hace aumentar el índice de fisuración del hormigón*.

En el caso del *hormigón pretensado* hay que tener presente la posibilidad de una *corrosión fisurante** de los alambres, así como la creación de una porosidad debida a electrolisis. Especialmente importante es la buena *adherencia*. Por la especial disposición de las armaduras sin estribos ni hierros transversales, en el caso de las viguetas pretensadas resulta particularmente fácil la realización de un circuito con corriente alterna trifásica y montaje de resistencias en estrella, con neutro a tierra, a la que van conectados también los extremos de las armaduras unidos entre sí, por medio de los macizos de anclaje.

Para el tratamiento de vigas, al cabo de una o dos horas después de enmoldado el hormigón, se ha calculado en algún caso la tensión o voltaje *E* de trabajo por la fórmula:

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

en la que:

E = tensión (voltios).

l = distancia entre electrodos (dm).

T = velocidad de calefacción (°C/hora).

ρ = resistencia eléctrica específica del hormigón (ohmios × dm).

Para ΔT se suele fijar el valor de 10°C/hora.

El valor de *ρ* para el hormigón fresco (sin adiciones salinas) suele oscilar entre 500 y 2.000 ohmios × cm²/cm (ohm × cm). Es variable con la relación agua/cemento (y con la variación de la cantidad de agua —agua libre— durante la hidratación), así como la proporción y naturaleza del cemento y de los áridos. Naturalmente varía mucho con el contenido de sales (electrólitos) en el hormigón.

El rendimiento térmico depende de la temperatura ambiente, del aislamiento, aparte de otras variables, y no puede ser calculado ni previsto sino para cada caso particular. Un consumo de 7 kW × m³ puede proporcionar a los tres días los 2/3 de la resistencia a veintiocho días.

Entre diversos datos experimentales dados a conocer figuran los siguientes: un tratamiento de ocho horas con armadura de 2,5 mm de diámetro (0,1") requiere una potencia de 50 vatios por metro lineal de armadura (150 vatios por metro lineal de viga de

* J. CALLEJA: "Corrosión de Armaduras en los Hormigones Armados y Pretensados". Monografía 256 del I. E. T. c. c. Madrid, 1966.

tres armaduras), y, por tanto, un *consumo de energía* de $1,2 \text{ kW} \times \text{hora}$ por metro lineal de viga, lo que supone 180 kW de potencia por cada bancada de 12 vigas de 100 m de longitud. Con estos datos y con la *resistencia eléctrica* del circuito, deducida del montaje de las armaduras y de la pérdida de *resistividad* del acero empleado, se puede calcular la *tensión de alimentación*, la cual es característica para cada banco de un tipo y número determinado de elementos y para un *tiempo* dado de tratamiento. La tensión de alimentación deberá *corregirse* al alcanzarse la *temperatura de trabajo* adecuada, pues *aumenta* del orden de un 6 ‰ por cada grado centígrado; además no deberá alcanzar valores que produzcan *fugas de corriente* entre las armaduras y tierra, contribuyendo a evitar éstas una resistencia elevada del lecho de los bancos. La *intensidad* suele estar limitada por las posibilidades de conexión, en relación con la temperatura de los contactos y el aprovechamiento de los alambres.

Acerca del *factor económico* en los tratamientos electrotérmicos, hay opiniones diversas. El que se consideren caros o baratos depende en cada sitio de las *disponibilidades* y del *precio* de la energía eléctrica. Lo que sí puede decirse es que son *cómodos* y de *fácil aplicación*. En el hormigonado de estructuras, durante el invierno, la calefacción eléctrica (tanto en el caso del hormigón en masa como en el del armado) puede suponer de un 10 a 15 % del coste total de la obra.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Como recomendación general después de todo lo expuesto, se insiste una vez más en que la eficacia, tanto en el aspecto técnico como en el económico, de un determinado proceso o tratamiento, debe determinarse experimentalmente en cada caso particular (y caso por caso) tomando como base las resistencias mecánicas de las piezas a corto, mediano y largo plazo, en comparación con las que resultarían de un curado normal.

En todo caso habrá que jugar con la calidad del producto, por una parte, y la producción y economía, por otra.

Los datos indicados en esta exposición, sobre la forma oportuna de efectuar un tratamiento con vapor, deben ser considerados sólo a título de orientación, y en tal sentido pueden servir como puntos de partida para la experimentación previa precisa para el establecimiento de un proceso industrial rentable y técnicamente satisfactorio.

Otra observación importante es la relativa a la ineludible necesidad de un control riguroso que permita vigilar la marcha correcta de los procesos, a fin de conocer en todo momento las condiciones de trabajo y conseguir para éste la uniformidad que requiere, para lograr una calidad elevada y al mismo tiempo homogénea

referencias bibliográficas seleccionadas por años desde 1934



1934:

1. MENZEL, C. A.: "Strength and volume change of steam-cured portland cement mortar and concrete". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 6(2), 125-148 (1934).

1935:

2. WICHMANN, W.: "Experiencias y ensayos con hormigón calentado por electricidad en la Unión Soviética". *Zement*, 36, 534 (1935).
3. ANÓNIMO: "Effect of curing temperature on the compressive strength of concrete at early ages". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 212-219, noviembre-diciembre (1935).
4. MENZEL, C. A.: "Studies of high pressure steam curing of tamped hollow concrete block". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 7(1), 51-64 (1935).

1936:

5. ANÓNIMO: "Die Druckdampfhärtung von Beton". *Tonindustrie Zeitung*, 60 (92 y 93), 1134-1135 y 1147-1148 (1936).
6. MENZEL, C. A.: "Studies of high pressure steam curing of concrete slabs and beams". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 621, mayo-junio (1936).
7. MIRONOV, S. A.: "Régime thermique optimum pour le béton". *Rev. Mat. Constr. Trav. Publ.*, 152-155, julio (1936).

1941:

8. DEVOUX, R.: "Etude sur la conductibilité électrique des bétons". *Techn. du Bâtiment et des Trav. Publ.*, núm. 6, 1, marzo (1941).

1944:

9. ANÓNIMO: "High pressure steam curing". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 409-417, abril (1944).
10. ANÓNIMO: "High pressure steam curing of concrete units". *Concrete*, 14, junio (1944).

1947:

11. ANÓNIMO: "Steam plus hot air for "preshrinking"". *Rock Products*, 198, agosto (1947).
12. COULLAUD, E.: "Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures". *Techn. du Bâtiment et des Trav. Publ.*, circulaire Série F, núm. 31, enero (1947).
13. IOVING, M. W.: "Make precast concrete strong, dense and impermeable". *Concrete Products*, 150-153 y 180, febrero (1947).
14. MANSFIELD, G. A.: "Most efficient methods determined by tests". *Concrete Products*, 154-157 y 178, febrero (1947).
15. NORDBERG, B.: "High temperature, high humidity speeds up the curing cycle". *Concrete Products*, 171-173 y 192, enero (1947).

1948:

16. ANÓNIMO: "Modern curing methods". *Rock Products*, 157, marzo (1948).

17. BROCARD, J.: "Accélération de la prise et du durcissement des liants hydrauliques par la chaleur". *Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publ.*, 54(4), diciembre (1948).
 18. BUSHELL, C. H. G.: "Effect of high pressure steam curing on volume changes of portland cement mortars". *Canadian Chem. Proc. Ind.*, diciembre (1948).
 19. MANSFIELD, G. A.: "Curing, a problem in thermodynamics". *Rock Products*, agosto (1948).
 20. MOCINE, D.: "High temperature curing". *Rock Products*, julio (1948).
 21. SHAVER, J. W.: "New Cedar rapid block plant is another monument to pioneering". *Concrete*, 7-11 y 46, septiembre (1948).
- 1949:
22. ANÓNIMO: "Making strength concrete". *The Builder*, 832-837, diciembre (1949).
 23. ANTHIA, K. F.: "Some modern methods of placing, compacting and curing concrete". *Indian Concrete Journal*, 104-108, mayo (1949).
 24. EHLE, J. C.: "Developments in the manufacture and technology of concrete masonry units". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 20(8), 613-620 (1949).
 25. ITAKAWA, C.: "Curing of concrete with electric current". *Mem. ac. Engng.*, Hokkaido Univ., 147-168, agosto (1949).
 26. McINTOSH, J. D.: "Electrical curing of concrete". *Concrete Research*, 21-29, enero (1949).
 27. NURSE, R. W.: "Steam curing of concrete". *Magazine of Concrete Research*, núm. 2, 79-88, junio (1949); *Hormigón Elástico* (Buenos Aires) III, 15-24 (1951).
 28. SHIDELER, J. J., y CHAMBERLIN, W. H.: "Early strength of concrete as affected by steam curing temperature". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 21(4), 273-283 (1949).
- 1950:
29. ANÓNIMO: "Métodos modernos de tratamientos de hormigones después del fraguado". *Rev. des Matériaux*, 64-65, febrero (1950).
 30. ANÓNIMO: "Curado del hormigón con vapor de agua". *Cement* (Holanda), núms. 17-18, 390-392 (1950).
 31. ANÓNIMO: "Mejora de la resistencia inicial del hormigón por medio del vapor". *Zement-Kalk-Gips*, 100-103, mayo (1950).
 32. AVERY, W. M.: "Tennessee block firm develops unique kiln for steam curing precast lintels". *Pit and Quarry*, 137-139, agosto (1950).
 33. AVERY, W. M.: "Something new in curing". *Pit and Quarry*, 173-174, septiembre (1950).
 34. BAUMGARTEN, R. H.: "Dampfhärtung von Betonsteinen". *Beton- und Stahlbetonbau*, 45(2), 41-42 (1950).
 35. CRANE, C. O.: "Steam curing protects winter concreting". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 213-216, noviembre (1950).
 36. DRIMILLA, H. R.: "Following a policy which insures customers satisfaction, Concrete Masonry Units does a thriving business in south western Ohio". *Pit and Quarry*, 175-177, septiembre (1950).
 37. KRONSBELN, W.: "La importancia del endurecimiento con vapor a presión en el desarrollo del hormigón poroso". *Zement-Kalk-Gips*, agosto (1950).
 38. SHORE, W. J.: "Design and engineering of steam curing installations for concrete blocks plants". *Pit and Quarry*, 137-139, diciembre (1950).
 39. SWAYZE, M. A.: "Finishing and curing: a key to durable concrete surfaces". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 317-322, diciembre (1950).
- 1951:
40. ANÓNIMO: "Steam curing with direct firing unit". *Rock Products*, enero (1951).
 41. ANÓNIMO: "Trabajos realizados en relación con el curado por vapor del hormigón". *Wirts. Bauen*, núm. 3, 14-16 (1951).
 42. ANÓNIMO: "Curing block with unique steam generator". *Concrete*, 6-7, mayo (1951).
 43. ANÓNIMO: "New package unit for curing block". *Concrete*, 20-24, julio (1951).

44. ANÓNIMO: "New Jersey blockmaker ups output of cinder units". *Association News*, agosto (1951).
45. ANÓNIMO: "High pressure steam autoclaves". *Rock Products*, 173-186, octubre (1951).
46. AVERY, W. M.: "Harter Marblecrete installs high pressure curing system". *Pit and Quarry*, 176-180 y 182, septiembre (1951).
47. BUDNIKOV, P. P., MATVIEV, M. A. y URCHIK, S. I.: "Influence of steam pressure on the physico-mechanical properties of sand-lime bricks with an admixture of granulated sodium silicate". *Building Science Abstracts*, 24(11), 323 (1951); *Doklady Akad. Nauk S. S. R.*, 81(2), 255-258 (1951).
48. CLARKSON, P.: "Heat treated concrete". *Engineering*, 172 (4468), 345-346 (1951).
49. GRANT, W.: "Manufacture of concrete masonry units". *Concrete*, 36-41, septiembre (1951).
50. KALOUSEK, G. L. y ADAMS, M.: "Hydration products formed in cement pastes at 25° to 175°C". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 23, 77-90 (1951).
51. KAMMULLER, K.: "Hormigón curado al vapor; investigaciones con mortero de cemento curado con vapor a alta presión". *Zement-Kalk-Gips*, 4(6), 143-146 (1951).
52. L'HERMITE, R.: "Nuevos procedimientos de tratamiento del hormigón". *Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publ.*, núm. 17, abril (1951).
53. LENHART, W. B.: "High pressure steam cured units". *Concrete Products*, 233-234, agosto (1951).
54. NORDBERG, R.: "Steam curing with direct firing unit". *Concrete Products*, 191-198, enero (1951).
55. NURSE, R. W.: "Curing of concrete elevated temperatures". *Building Research Congress*, División 2, 86-91 (1951).
56. OHAMA, F.: "A research for the curing of concrete by means of electricity". *Japan Soc. Civil Engrs. Journal*, 36(4), 186-190 (1951).
57. PRICE, W. H.: "Factors influencing concrete strength". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 22(6), 417-432 (1951).
58. SAUL, A. G. A.: "Steam curing of concrete at atmospheric pressure". *Concrete Research*, 6, 127-135 (1951).
59. SAUL, A. G. A.: "Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure". *Magazine of Concrete Research*, 127-140, marzo (1951).
60. SHAVER, J. W.: "Curing block with high pressure steam". *Concrete*, 20-22, septiembre (1951).
61. YAMADA, J.: "Studies on electrically heated concrete". *Japan Soc. Civil Engrs. Journal*, 36(2), 72-77 (1951).

1952:

63. ANÓNIMO: "Curing of concrete". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 701-748, mayo (1952)
64. CALLEJA, J.: "Nuevas técnicas para el estudio del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos: influencia de la temperatura en el fraguado". *Revista de Ciencia Aplicada*, núm. 29, 506-516 (1952).
65. CLARKSON, P.: "Heat treated concrete". *Indian Concrete Journal*, 121-124, abril (1952).
66. EASTERLY, H. W., JR.: "Correlation of shrinkage and curing in concrete masonry units". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 23(5), 393-402 (1952).
67. ITAKURA, C.: "Calentamiento eléctrico del hormigón en la construcción durante el invierno". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 23(9), 753 (1952).
68. LENHART, W. B.: "Small capacity plant uses autoclaves steam curing". *Rock Products*, 196-197, octubre (1952).
69. PICKETT, V. B.: "Steam curing effect on concrete strength". *Concrete*, 8-10, diciembre (1952).

1953:

70. ANÓNIMO: "More notes on high-pressure steam curing". *Concrete*, 16-22, 26 y 28-31, agosto (1953).
71. CALLEJA, J.: "Nuevas técnicas para el estudio del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos: aceleración del fraguado mediante calefacción por efecto Joule". *Revista de Ciencia Aplicada*, núm. 35, 494-505 (1953); *Zemento-Kalk-Gips*, 6(42), 282 (1953).
72. BERGSTROM, S. G.: "Temperatura de curado, edad y resistencia del hormigón". *Betong*, 38(1), 1-10 (1953). *Magazine of Concrete Research*, núm. 14, 61-66 (1953).

73. MINSK, L. D.: "Automatic continuous curing kiln". *Rock Products*, 213-215 y 232, abril (1953).
74. SEW, B. R.: "The curing of concrete". *Indian Concrete Journal*, 27(10), 371-374 (1953).
75. SHORE, W. M. J.: "Cutting cost of high pressure curing". *Rock Products*, 204-206, junio (1953).
- 1954:
76. ANÓNIMO: "Demonstration of successive use of saturated and superheated steam at Fort Myers, Fla. block plant". *The Concrete Manufacturer*, 166-167, febrero (1954).
77. ANÓNIMO: "High pressure steam discussed at St. Louis". *Concrete*, 22-26 y 52, abril (1954).
78. ANÓNIMO: "Influence de la température sur le durcissement de béton. *Bulletin du Ciment*, 22(4), abril (1954). Service de Recherches et Conseils Techniques de l'E. G. Portland Wildegg, Suiza.
79. CZERNIN, W.: "Betonhärtung bei höheren Temperaturen". *Arbeitstagung des Verbandes österreichischer Betonsteinwerke*. Innsbruck, 23 octubre (1954).
80. KALOUSEJ, G. L.: "Studies on the conditions phases of autoclaved concrete products made of different rawmaterials". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 25(5), 365-378 (1954).
81. LENHART, W. B.: "Steam curing plus hot-air drying". *Concrete Products*, 195-196, junio (1954).
82. LEWICKI, E.: "Curado al vapor del hormigón para obtener alta resistencia inicial". *Bauplanung und Bautechnik*, 8(3), 130-136 (1954).
83. MELJN, S. J.: "Probleme der Dampfhärtung". *Betonstein-Zeitung*, núm. 12, 520-523 (1954).
84. SELDEN, J. K.: "Autoclaved concrete products". *Concrete Products*, 142-146, mayo (1954).
85. SELDEN, J. K.: "Autoclaved concrete products". *Concrete products*, 216-218, agosto (1954).
- 1955:
86. GRAFF, O.: "Feststellungen zur Dampfhärtung des Betons". *Betonstein-Zeitung*, núm. 9, 407-409 (1955).
85. SHORE, W. J.: "Advantages of gradual conversion to autoclaving operation". *The Concrete Manufacturer*, 258-260, enero (1955).
- 1956:
88. BROCARD, J.: "Les divers procédés d'accélération de la prise et du durcissement des bétons applicables à la préfabrication". *Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publ.*, 38, 103-104, julio-agosto (1956).
89. KUENNING, W. H. y CARLSON, C. C.: "Effects of variations in curing and drying on the physical properties of concrete masonry units". *Portland Cement Association, Bulletin D 13, Development Department Series*, Skokie (1956).
90. LUDWIG, N. C. y PENCE, S. A.: "Properties of portland cement pastes cured at elevated temperatures and pressures". *Journ. Amer. Concrete Inst.* 27(6), 673-687 (1956).
- 1957:
91. MALININ, L. A.: "La composition du ciment portland et la pression optimum de vapeur dans le traitement des pièces en béton à l'autoclave". *Béton et Béton Armé*, 36-40, febrero (1957).
92. SCHAFER, H.: "Endurecimiento del hormigón con vapor". *Betonstein-Zeitung*, cuaderno 5 (1957).
- 1958:
93. CALLEJA, J.: "El cloruro cálcico como acelerador en la prefabricación del hormigón". *Revista de Ciencia Aplicada*, núms. 61 y 62, 122-135 y 201-211 (1958).
94. CZERNIN, W.: "Einige Bemerkungen über das Verhalten der Zemente bei Dampfbehandlung". *Betonstein-Zeitung*, 24(3), 24-28 (1958).
- 1959:
95. MANCHE, H.: "Le traitement thermique des bétons sous vapeur à la pression atmosphérique". *Rev. Mat. Constr.*, núm. 523, 97-105 (1959).
- 1960:
96. WALZ, K.: "Der Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen". *Beton*, 10(5), 222-232 (1960).

1961:

97. BROWN, H. E.: "A literature survey of steam curing at atmospheric pressure". *Virginia Council of Highway Investigation and Research*, Charlottesville (1961).
98. HIGGINSON, E. C.: "Effect of steam curing on the important properties of concrete". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 58(3), 281-296, septiembre (1961).
99. WISCHERS, G.: "Einfluss einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung". *Verein Deutscher Zementwerke e. V.*, Heft 28, Series: Schriftenreihe der Zementindustrie, Düsseldorf (1961).

1962:

100. BIBLIOGRAPHIE sur l'accélération du durcissement du ciment et des bétons par la chaleur". *Revue des Matériaux*, 557, 57-63 (1962).
101. HANSON, J. A.: "Optimum steam curing procedure in precasting plants". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 60(1), 75-100 (1962).
102. MERRIT, R. R. y JOHNSON, J. W.: "Steam curing of portland cement at atmospheric pressure" *Highway Research Bulletin*, 355, 1-26 (1962).
103. VERBECK, G. J.: "Steam curing and autoclave curing of concrete". *Portland Cement Association, Skokie*. Lecture held at the Annual Meeting (1962).

1963:

104. AURICH, H.: "Zum Einfluss der Vorlagerungszeit bei der Wärmebehandlung von Beton". *Betonstein-Zeitung*, 29(3), 143 (1963).
105. BLONDIAU, L.: "Etuvaie et autoclavage des bétons de ciment portland, ciment de haut fourneau et ciment sursulfaté I: Considerations générales relatives au traitement à la vapeur des bétons". *Revue des Matériaux*, 568, 4-14 (1963).
106. BLONDIAU, L.: "Etuvaie et autoclavage des bétons de ciment portland, ciment de haut fourneau et ciment sursulfaté II: Etuvaie: Durcissement en vapeur saturante à la pression normale". *Revue des Matériaux*, 569, 52-63 (1963); 570, 82-97 (1963).
107. BLONDIAU, L.: "Etuvaie et autoclavage des bétons de ciment portland, ciment de haut fourneau et ciment sursulfaté III: Autoclavage: Durcissement à la vapeur sous pression". *Revue des Matériaux*, 571, 126-239 (1963); 572, 163-167 (1963); 573, 204-210 (1963); 576, 300-302 (1963); 578, 372-387 (1963); 579, 400-414 (1963).
108. KEENE, P. W.: "Concrete cured in seteam at atmospheric pressure". *South African Council for Scientific and Industrial Research*, Pretoria (1963).
109. MALINOVSKY, R.: "Einige Wärmehärtungsmethoden des hochfesten Betons und ihre Anwendung im Betonwerk". *Chalmers Tekniska Högskola*, Series CtH, Inst. f. Byggnadsteknik, Göteborg (1963).
110. RIHA, J.: "Schnegeverfahren zur Beschleunigung der Erhärtung von Beton I". *Baustoffindustrie*, 6(2), 40-44 (1963).
111. RIHA, J.: "Schnegeverfahren zur Beschleunigung der Erhärtung von Beton II". *Baustoffindustrie*, 6(3), 71-73 (1963).
112. SHIDELER, J. J.: "Low pressure steam curing". *Journ. Amer. Concrete Inst.*, 60(8), 953-986 (1963).
113. WISCHERS, G. y KRUMM, E.: "Verwendung von heissem Anmachwasser für Beton in Winterbau". *Beton*, 13(10), 463-466 (1963).

1964:

114. BACHE, H. H.: "Note on dimensional changes, pore fluid pressure and flow in porous, saturated solids exposed to changes in temperature, with special reference to hardened cement paste". *Betonforskningslaboratoriet*, Series BFL Internal Report No. 93, Karlstrup (1964).
115. BERKOLTCH, T. M., KHEIKER, D. M., GRACHVA, O. I., VOLKOV, O. S. y MIKHALEEVSKAYA, E. S.: "Hydration processes in the accelerated hardening of cement". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
116. BUDNIKOV, P. P., ROYAK, S. M., MALININ, J. S. y MAYANTS, M. M.: "Investigations into hydration processes of portland cement in heat-moist treating at the temperature up to 100°C". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
117. BUTT, J. M., TIMASHOV, V. V. y LIKATZKAYA, L. A.: "Acceleration of cement hardening at temperatures of 20-100°C". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
118. GORYAINOV, C. E. y VEKSLER, E. C.: "Destruction in early-agehardening concrete when heating, and methods of decreasing its intensity". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).

119. IVANOV, F. M., KRASOVSKAYA, T. G. y SOLNSEVA, V. L.: "Effect of heat-moist treatment on structure and properties of cement mortars". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 120. KEISER, L. A., MARJAMOV, N. B. y PANFILOVA, L. I.: "Temperature gradients in concrete of precast structures subjected to steam-curing and their influence on concrete quality and durability". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 121. MEHEDLOV-PETROSIAN, O. P., BUNAKOV, A. G. y VOROBYOV, J. L.: "Physico-chemical fundamentals of directed structureformation in accelerated manufacturing reinforced concrete units". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 122. MIRONOV, S. A.: "Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 123. NEPPER-CHRISTENSEN, P. y SKOVCAARD, P.: "Drying shrinkage of low pressure steamcured concrete units". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 124. NURSE, R. W.: "Physico-chemical fundamentals and methods of accelerated hardening of concrete". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 125. REINSDORF, S.: "Improvement relating to low pressure steam curing and heating concrete at temperatures up to 100°C". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 126. SHEIKIN, A. E. y OLEINIKOVA, N. I.: "Effect of hydrothermal treatment and fineness of grinding of cement on the structure and properties of cement stone". *RILEM Symposium*, Moscú, julio (1964).
 127. WU CHUNG-WEI: "Presteaming and temperature-rise periods of low-pressure steam curing of mortar and concrete". *Research Institute of Building Materials*, Pekin (1964).
- 1965:
128. BACHE, H. H. y WIBHOLM, O. M.: "Varmehaerdning af beton". *Betonforskningslaboratoriet*, Series BFL Internal Report No. 102, Karlstrup (1965).
 129. BALASZ y KUNSZT: "Causes for deterioration of steam-cured concrete structures". *Magyar Epítőipari*, 9, 98-99 (1965).
 130. BROWN, H. E.: "An investigation of the delay period and related factors in steam cured concrete". *Investigation and Research*, Charlottesville (1965).
 131. CEMBUREAU: "Endurecimiento eléctrico del hormigón". Technical Newsletter No. 8 (1965). *Cemento y Hormigón*, núm. 373, 601-604 (1965).
 132. MALINOVSKY, R.: "Inverkan av temperaturen po betongens härdning". *Chalmer Tekniska Högskola*, Series CtH, Inst. f. Byggnadsteknik, Publ. No. 704, Göteborg (1965).
 133. MOOREHEAD, D. R. y McCARTNEY, E. R.: "Hydrothermal formation of calcium silicate hydrates". *Journ. Amer. Ceramic Soc.*, 48(11), 565-569 (1965).
 134. SKOVGAARD, P.: "Accelereret haerdning af beton". *Beton-Teknik*, 31(2), 41-54 (1965).
- 1966:
135. BACHE, H. H. y DRAGSHOLT, P.: "Bibliography to Varmehaerdning af beton". *Rapport número 134*, Karlstrup, septiembre (1966).
 136. BROWN, H. E.: "Interim Report - An investigation of the durability of steam-cured concrete". *Virginia Council of Highway Investigation and Research*, Charlottesville (1966).
 137. ODLER, J. y GEBAUER, J.: "Zementhydratationen bei der Warmbehandlung - I". *Zement-Kalk-Gips.*, 55(6), 276-281 (1966).