

# EL CURADO A VAPOR DEL HORMIGON

Por CARLOS CARRIL CARVAJAL,  
Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor un estudio teórico del curado a vapor del hormigón y reseña una serie de ensayos efectuados que confirman y completan las conclusiones obtenidas.

En la construcción de elementos prefabricados de hormigón se emplea, frecuentemente, el curado a vapor de agua, al objeto de acelerar el fraguado del hormigón, con la consiguiente economía en moldes al poderse efectuar el desmoldeo pocas horas después del hormigonado, al mismo tiempo que se consigue que el fraguado tenga lugar en unas condiciones óptimas de humedad y temperatura.

La forma de llevar el proceso del curado a vapor en función del tiempo y de la temperatura tiene una importancia extraordinaria en cuanto al resultado obtenido. El Bureau of Reclamation da, en su *Concrete Manual*, las curvas de resistencias de la figura 1.ª, obtenidas en probetas de hormigón sometidas a un curado a vapor a temperaturas constantes. Estas resistencias están referidas a la de una probeta análoga a los tres días, curada en humedad.

Del examen de estas curvas se deduce que, en las condiciones en que se efectuaron los ensayos a que se refiere el Bureau of Reclamation (temperatura constante, hormigón de 306 Kg. de cemento/m.<sup>3</sup> y cemento tipo II):

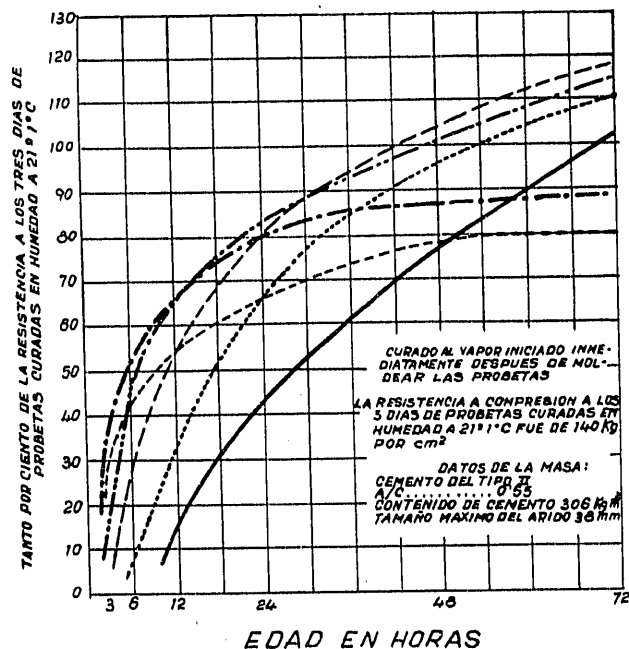


Figura 1.ª

1.º La máxima aceleración en la adquisición de resistencia inicial y mínima pérdida en la resistencia final, se obtienen a temperaturas comprendidas entre 54,5 y 74° C.

2.º Las temperaturas más elevadas producen mayores resistencias a edades muy tempranas, pero ocasionan importantes pérdidas de resistencia a edades superiores a los dos días.

3.º El diferir la iniciación del curado a vapor de dos a cuatro horas para temperaturas comprendidas entre 37,8 y 74° C., produce una resistencia a las veinticuatro horas superior a la obtenida iniciando el tratamiento inmediatamente después del hormigonado. Para temperaturas mayores, debe retardarse más el principio del tratamiento.

Aparte de todo esto, el Bureau of Reclamation recomienda aplicar el vapor por igual en todas las superficies de la pieza, para evitar las tensiones producidas por las diferencias de temperatura.

La necesidad de obtener un rápido desmoldeo sin pérdida alguna de resistencia en la fabricación de tubería y últimamente en la construcción de canales prefabricados, nos ha llevado a estudiar el problema del curado a vapor del hormigón con gran interés, habiendo llegado a resultados que, por diferir esencialmente de los reseñados por el Bureau of Reclamation, creemos pueden resultar de algún interés.

## Estudio teórico del fenómeno.

La temperatura a que debe mantenerse el hormigón fresco antes de iniciarse el fraguado, debe estar comprendida entre 4 y 50° C. Una temperatura superior a 50° C. perjudica la resistencia del hormigón, según hemos visto en los ensayos del Bureau of Reclamation, confirma A. G. Sand en el número de enero de 1952 de la *Constructional Review*, y hemos podido constatar en nuestros propios ensayos. El curado a vapor del hormigón no debe alcanzar, por consiguiente, los 50° C. hasta el momento en que se haya iniciado el fraguado.

M. J. Brocard, en el número de diciembre de 1948 de *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et Travaux Publics*, da las curvas, que se representan en la figura 2.ª en trazo lleno, y que indican el principio y el fin del fraguado de un cemento

portland ordinario a diferentes temperaturas del medio ambiente. Las medidas fueron hechas con la aguja de Vicat, siguiendo el método normalizado.

Esta parábola da, en el intervalo de temperaturas utilizable, una representación aceptable de la de iniciación del fenómeno.

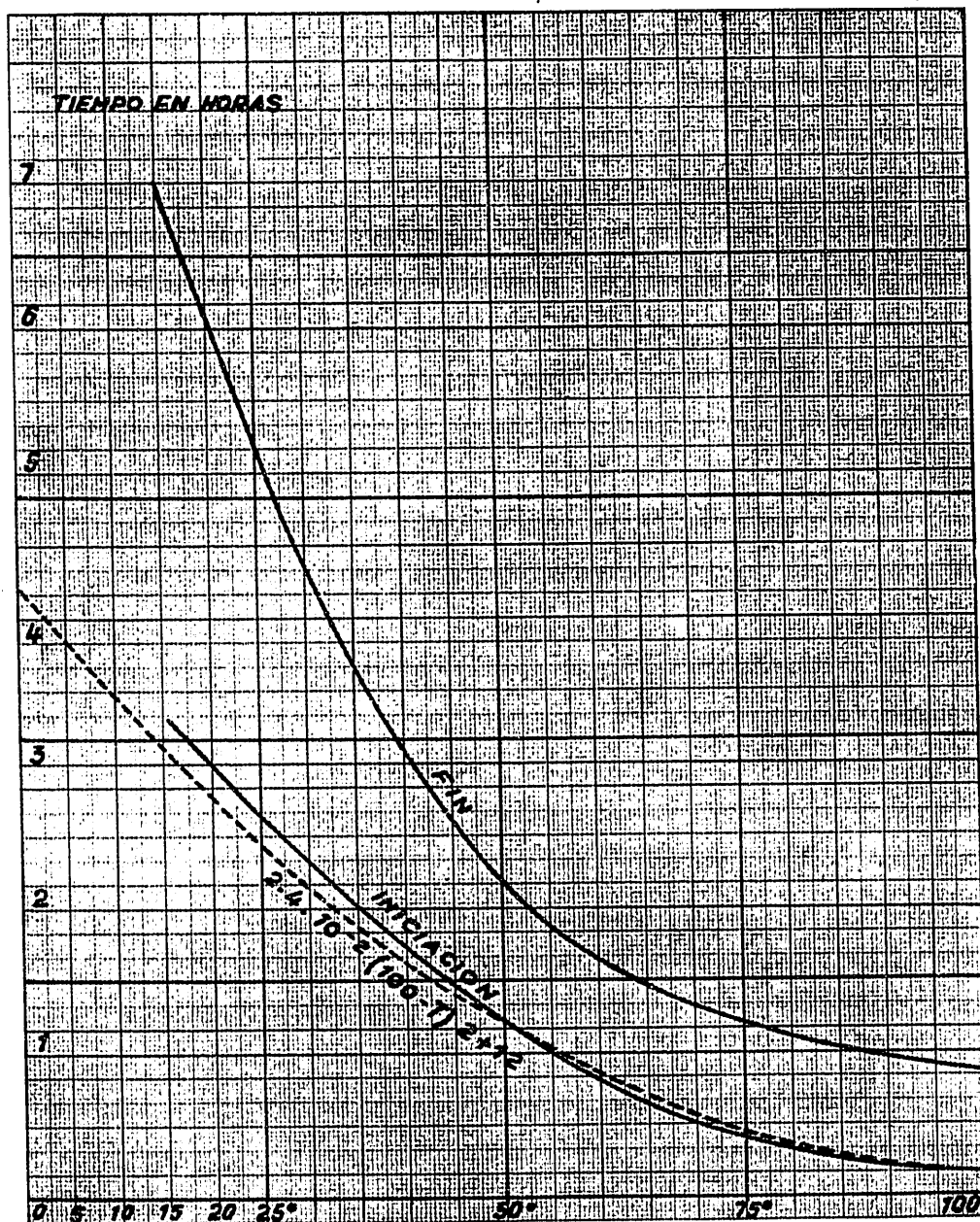


Figura 2.ª

En el mismo gráfico se ha representado de puntos la parábola

$$t = 2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12;$$

siendo:

$t$  = tiempo, en minutos, de la iniciación del fraguado.  
 $T$  = temperatura constante del medio ambiente.

En la práctica del curado a vapor, la temperatura en la masa del hormigón a tratar no se mantiene constante durante todo el tiempo del tratamiento, por dos razones:

- 1.ª Por la velocidad de penetración del calor a través del hormigón.
- 2.ª Porque resulta más conveniente aumentar la

temperatura progresivamente para obtener un resultado satisfactorio.

Si llamamos  $t'$  a la edad, en minutos, del hormigón a la cual corresponde una temperatura  $T$ , la

y en el momento de iniciarse el fraguado deberá verificarse:

$$\int_0^{t'} \frac{dt'}{2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12} = 1.$$

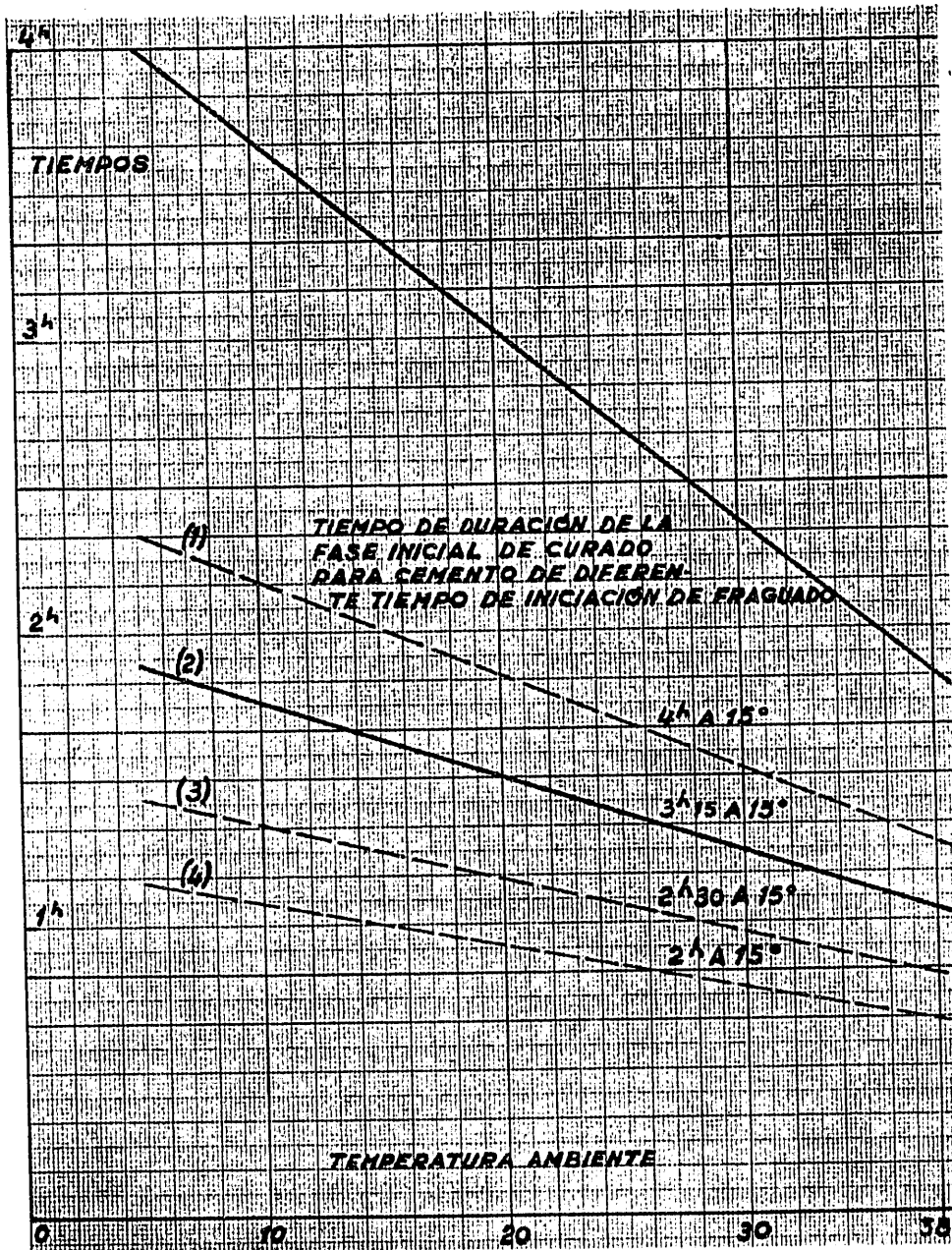


Figura 3.ª

relación del tiempo a que está sometido a la temperatura  $t'$  al tiempo necesario para la iniciación del fraguado, será:

$$\frac{t'}{2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12};$$

Si la ley de aumento de la temperatura es  $t' = f(T)$ , resultará:

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{f(T) dT}{2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12} = 1;$$

Si consideramos ahora un aumento lineal de la temperatura de la forma  $t' = k T$ , tendremos:

tendremos:

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{k d T}{2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12} = 1;$$

$$k = 2,85 \gg \boxed{t' = 2 \text{ h. } 10 \text{ m.}} \text{ en invierno.}$$

ecuación que, integrada, nos da:

Si consideramos:

$$-1,865 k \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{2,4 \cdot 10^3 (100 - T)} \Big|_{T_0}^{T_1} = 1;$$

$$T_0 = 25^\circ \text{ C., en verano,}$$

$$T_1 = 50^\circ \text{ C.,}$$

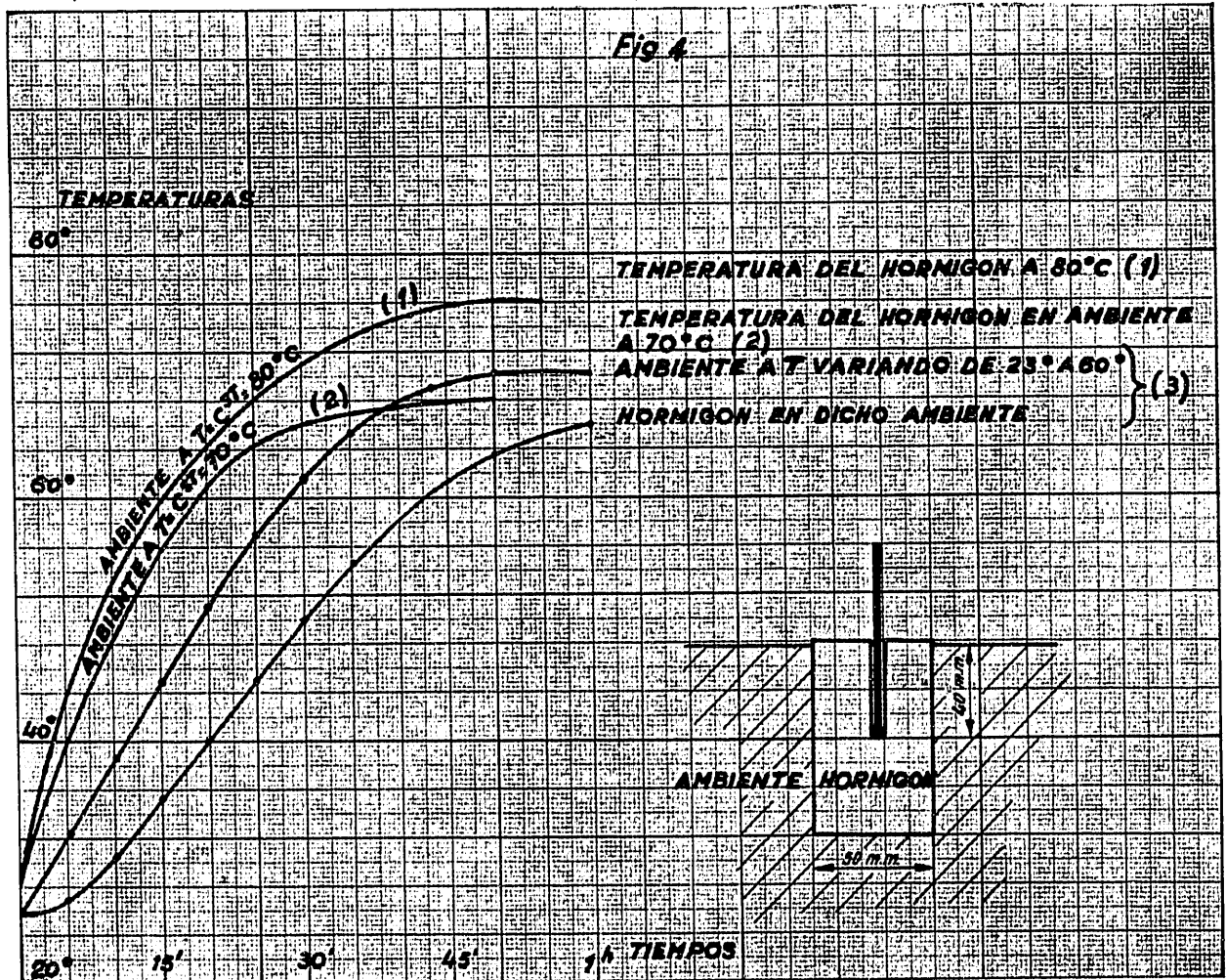


Figura 4ª

en donde:

tendremos:

$T_0$  = temperatura del medio ambiente.

$$K = 0,42 \gg \boxed{t' = 1 \text{ h. } 45 \text{ m.}} \text{ en verano.}$$

$T_1$  = temperatura en el momento de iniciarse el fraguado.

Si consideramos:

Si tenemos en cuenta que desde que se ha hecho la amasada hasta que puede iniciarse el curado a vapor tiene que pasar un determinado tiempo (hormigonado), en el cual el hormigón está sometido a

$$T_0 = 5^\circ \text{ C., en invierno.}$$

$$T_1 = 50^\circ \text{ C.,}$$

Ensayos de curado a vapor interno.

E	F	C	t°	T°	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	RESISTENCIAS		
								R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
Ensayo	Fecha	Cemento	Temperatura ambiente — Grados	Tiempo transcurrido desde amasado a principio curado	Tiempo transcurrido desde t° a 50°	Tiempo transcurrido desde 50° a 80°	Tiempo total de curado	1 hora después del curado — Kg./cm. <sup>2</sup>	7 días después del curado — Kg./cm. <sup>2</sup>	7 días después (probeta sin curar) — Kg./cm. <sup>2</sup>
I	12-3-55	Sansón	12/15	1 hora	30'	2 h. 30'	3 h.	4,7	8,25	20,2
II	15-3-55	»	19/21	»	1 h.	2 h.	3 h.	9,1	20,0	25,0
III	16-3-55	»	18	»	30'	2 h. 30'	3 h.	5,3	19,2	44,6
IV	17-3-55	»	16	»	1 h.	2 h.	3 h.	4,4	27,8	38,7
V	18-3-55	»	17	»	1 h.	2 h.	3 h.	6,1	25,5	35,4
VI	21-3-55	»	19	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	10,0	29,6	40,1
VII	22-3-55	»	21	»	2 h.	1 h.	3 h.	8,3	33,0	43,3
VIII	23-3-55	»	24	»	2 h. 30'	30'	3 h.	5,1	34,3	41,6
IX	24-3-55	»	24	»	3 h.	—	3 h.	3,8	32,2	40,9
X	25-3-55	»	23	»	2 h. 30'	30'	3 h.	5,9	32,0	38,6
XI	28-3-55	»	21	»	2 h.	1 h.	3 h.	7,1	26,3	30,1
XII	29-3-55	»	22	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	9,1	25,3	30,5
XIII	30-3-55	»	19	»	1 h.	2 h.	3 h.	6,5	23,5	33,5
XIV	31-3-55	»	18	»	30'	2 h. 30'	3 h.	4,0	17,6	34,2
XV	1-4-55	»	20	»	30'	2 h.	2 h. 30'	2,5	No hay probetas.	
XVI	4-4-55	»	20	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	4,0	—	28,0
XVII	5-4-55	»	19	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	8,1	30,7	34,9
XVIII	6-4-55	»	21	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	3,9	23,7	27,2
XIX	11-4-55	»	22	»	30'	2 h.	2 h. 30'	6,3	28,2	32,7
XX	12-4-55	»	23	»	1 h.	1 h. 30'	2 h. 30'	4,0	25,0	30,0
XXI	13-4-55	Titán	22	»	1 h. 30'	1 h. 30'	3 h.	14,0	38,5	45,3
XXII	14-4-55	»	23	»	1 h.	1 h.	2 h.	8,2	37,2	51,0
XXIII	15-4-55	»	21	»	1 h.	1 h. 30'	2 h. 30'	10,6	29,1	38,5
XXIV	19-4-55	»	21	»	1 h. 30'	1 h.	2 h. 30'	7,3	26,1	36,6
XXV	20-4-55	»	20	»	2 h.	30'	2 h. 30'	4,2	23,2	30,3
XXVI	21-4-55	»	21	»	1 h. 30'	1 h.	2 h. 30'	8,7	30,1	34,6
XXVII	22-4-55	Caballo	23	»	1 h. 30'	1 h.	2 h. 30'	9,2	34,2	41,4
XXVIII	25-4-55	»	23	»	2 h. 30'	—	2 h. 30'	4,2	33,9	41,1
XXIX	26-4-55	»	21	»	30'	2 h.	2 h. 30'	8,2	28,1	38,9
XXX	27-4-55	»	23	»	1 h.	1 h. 30'	2 h. 30'	8,4	23,6	31,1
XXXI	28-4-55	»	22	»	1 h. 30'	1 h.	2 h. 30'	8,8	27,0	34,4
XXXII	29-4-55	»	22	»	2 h.	30'	2 h. 30'	6,6	26,0	32,2
XXXIII	3-5-55	»	23	»	—	2 h. 30'	2 h. 30'	4,4	20,08	33,3
XXXIV	5-5-55	Titán	27	2 horas	—	2 h. 30'	2 h. 30'	4,0	—	—
XXXV	9-5-55	»	26	»	30'	2 h.	2 h. 30'	5,5	30,2	40,1
XXXVI	10-5-55	»	26	»	1 h.	1 h. 30'	2 h. 30'	14,5	33,6	38,6
XXXVII	11-5-55	»	28	»	1 h. 30'	1 h.	2 h. 30'	10,6	32,4	37,8
XXXVIII	12-5-55	»	26	»	2 h.	30'	2 h. 30'	5,5	34,6	39,0
XXXIX	13-5-55	»	26	»	2 h. 30'	—	2 h. 30'	5,0	30,3	39,8
					40°	60°	80°			
1	17-5-55	Titán	25	2 horas	45'	45'	2 h. 30'	12,50	37,9	43,2
2	18-5-55	»	26	»	45'	45'	2 h. 30'	11,15	29,8	35,6
3	20-5-55	»	26	»	»	»	»	12,00	26,0	37,7
4	23-5-55	»	20	»	»	»	»	11,85	—	—
5	24-5-55	»	22	»	»	»	»	13,05	—	—
6	25-5-55	»	22	»	»	»	»	11,10	—	—
7	26-5-55	»	21	»	»	»	»	10,80	—	—
8	27-5-55	»	27	»	»	»	»	15,15	—	—

Las resistencias que se indican han sido obtenidas por rotura a flexión de probetas prismáticas de 5 × 5 × 30 cm.

la temperatura del medio ambiente, tiempo que puede evaluarse sin gran error en 30 minutos, tendremos:

$$1,865 k \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{2,10^3 (100 - T)} \Big|_{T_0}^{50} =$$

$$= 1 - \frac{30}{2,4 \cdot 10^2 (100 - T)^2 + 12};$$

siendo:

$$t' = k (50 - T_0).$$

Con ello podemos dibujar la curva de los tiempos de duración de la fase inicial de curado en función de la temperatura del medio ambiente. En la figura 3.<sup>a</sup> se representan estas leyes de variación para diferentes cementos con distintas características de iniciación de fraguado.

Como consecuencia de todo ello, resulta que la forma aconsejable de llevar el curado a vapor de un hormigón para obtener la máxima resistencia en el mínimo tiempo, sin detrimento de su resistencia final, es la siguiente:

1.º Aumento progresivo de la temperatura: de 5 a 50º en dos horas, durante el invierno; de 25 a 50º en una hora veinte minutos, durante el verano.

2.º Aumento de la temperatura hasta 60-70º y mantenimiento de esta temperatura el resto del tratamiento.

3.º Dejar enfriar la pieza antes de desmoldear.

## Ensayos efectuados.

Partiendo de los resultados teóricos antes obtenidos, hemos efectuado una serie de ensayos que confirman y completan aquellas conclusiones.

Todos los ensayos han sido efectuados con medios industriales en las fábricas de tubería y canales prefabricados de "Materiales y Tubos Bonna, S. A.", en Cornellá de Llobregat y en Jerez de la Frontera, lo cual hace que carezcan de la precisión que podrían tener de haberse hecho en un laboratorio, pero en cambio tienen la ventaja de ajustarse más a la realidad de la práctica.

M. G. Arbils ha obtenido las curvas de penetración de calor en la masa del hormigón que se indican en el gráfico de la figura 4.<sup>a</sup>. Para obtener estas curvas se sometió un paralelepípedo de hormigón de 5 cm. de espesor en ambientes a temperaturas constantes de 70 y 80º C. La misma probeta se sometió a un ambiente de temperatura variable hasta 65º C.

Las curvas demuestran que la temperatura penetra muy rápidamente en la masa del hormigón que, en el segundo caso, lleva un retraso de diez minutos sobre la del ambiente. Por esa razón puede tomarse la temperatura del ambiente como la del hormigón, sin gran error.

Los resultados obtenidos en los ensayos efectuados son los que se detallan en el cuadro adjunto.