

tratamientos térmicos del hormigón

J. CALLEJA, Dr. en Ciencias Químicas

0. INTRODUCCION

En la industria de la construcción y en la de la prefabricación de elementos constructivos a base de hormigones y morteros, interesa por múltiples razones acelerar y acortar los procesos de fraguado y de endurecimiento.

Según las circunstancias, esto puede conseguirse de muy diversas formas: *a)* por empleo de *conglomerantes especiales*: cementos de altas resistencias iniciales o de endurecimiento rápido, cemento aluminoso, etc.; *b)* por empleo de *aceleradores de fraguado y de endurecimiento* a todas las edades: tipo cloruro cálcico, por ejemplo; *c)* por *curado o tratamiento térmico* del conglomerado. Los dos primeros procedimientos pueden calificarse de *químicos*, mientras que el tercero entra en la categoría de los *físicos*. La realidad es que unos y otros tienen una base *fisicoquímica*.

Estos métodos distintos, en algunos casos no se excluyen mutuamente, sino que se complementan. Así, *es compatible* el empleo de un acelerador con un cemento portland de endurecimiento rápido o con un curado térmico. En otros casos, en cambio, *no es aconsejable* simultanear dichos métodos; tal sucede con el empleo de los cementos de altas resistencias y los tratamientos térmicos. Casos hay también en que una simultaneidad es *totalmente impropcedente*, como ocurre con el empleo de cloruro cálcico con cemento aluminoso, o de éste en un curado por calor.

Es en la *prefabricación* de piezas de hormigón donde los tratamientos térmicos han alcanzado mayor desarrollo, combinados o no con el empleo de aceleradores. Las ventajas técnicas y económicas que estos tratamientos aportan son: aumento de la *producción*; ahorro de *moldes* y mayor rendimiento de éstos al poder desmoldar en menor tiempo; ahorro de *espacio* de curado y almacenamiento; posibilidad de una más inmediata *puesta en servicio* de las piezas, etc., sin contar con el ahorro en concepto de *mano de obra*, todo lo cual implica una considerable mejora de la *productividad*.

Los tratamientos térmicos requieren una estrecha vigilancia, ya que no basta conseguir con ellos unas buenas resistencias mecánicas *a corto plazo*, si no se evita al máximo *la caída* de las mismas *a plazos normales y largos*, cosa que en cierta medida suele suceder con frecuencia. En general, las resistencias a la *flexión* permiten juzgar mejor que las de compresión acerca de los efectos de un tratamiento térmico.

En el Instituto "Eduardo Torroja" de la Construcción y del Cemento (I. E. T. c. c.) se han llevado a cabo estudios experimentales acerca del empleo de aceleradores del fraguado y del endurecimiento de los conglomerantes *, así como sobre la influencia de la temperatura en el fraguado y sobre la aceleración de éste por calefacción eléctrica **. Igualmente se han verificado ensayos sobre productos de adición y sobre tratamientos térmicos, los cuales no han sido objeto de publicación, pero han permitido fijar condiciones óptimas de empleo o de aplicación, confirmar o desechar hipótesis y, en definitiva, adquirir experiencia.

Estos ensayos, así como las consultas formuladas al I. E. T. c. c., en una determinada época, aconsejaron la publicación en su momento de una nota *** con lo más destacado acerca de los tratamientos térmicos del hormigón mediante calefacción con vapor libre.

Con posterioridad ha habido ocasión de corroborar de manera experimental y directa las conclusiones que destacaban en aquella nota.

Todo ello ha culminado más recientemente en la presente publicación sobre curado y tratamientos térmicos, cumpliendo así con lo anunciado y prometido en ocasiones anteriores.

1. GENERALIDADES

1.1. Termoquímica de la hidratación y de los procesos de curado térmico del cemento.

La *hidratación* (fraguado y endurecimiento) de los conglomerantes hidráulicos, es un conjunto de *procesos o reacciones químicas*.

En la cinética de los procesos químicos intervienen como variables la *presión*, la *temperatura*, la *concentración* y la acción de *catalizadores* eventuales.

La hidratación de los conglomerantes transcurre prácticamente siempre a la *presión atmosférica ordinaria*, en general, sin participación de una *fase gaseosa activa*, por lo cual la presión no influye en el desarrollo de las correspondientes reacciones.

El efecto combinado de la presión y de la temperatura en los tratamientos con vapor en *autoclave* merece una mención especial.

La influencia de la *concentración* y de los catalizadores (*aceleradores* o *retardadores*) es la previsible y requiere también un estudio aparte ****.

Todo proceso químico se ve *acelerado* por la *elevación de la temperatura*, hasta tal punto que cada *aumento* de ésta en 10°C, aproximadamente *duplica la velocidad de reacción*.

* J. CALLEJA: "El Cloruro Cálcico en la Construcción". *Manuales y Normas* del I. E. T. c. c. Madrid, 1957.

J. CALLEJA: "El Cloruro Cálcico como Acelerador en la Prefabricación del Hormigón". *Monografía* número 185 del I. E. T. c. c. Madrid, 1958.

** J. CALLEJA: "Nuevas Técnicas para el estudio del Fraguado y Endurecimiento de los Aglomerantes Hidráulicos. Influencia de la Temperatura en el Fraguado". *Revista de Ciencia Aplicada* VI (29/6), 506-516 (1952).

J. CALLEJA: "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* VII (35/6), 494-505 (1953).

*** J. CALLEJA: "Tratamientos Térmicos del Hormigón". *Materiales de Construcción. Ultimos Avances* (I. E. T. c. c.) núm. 85, págs. 3-6, enero-febrero 1958.

**** J. CALLEJA y B. BACLE: "Aditivos para el Hormigón". *Manuales y Normas* del I. E. T. c. c. Madrid (en prensa).

En el caso del cemento portland y de los conglomerantes a base del mismo, la explicación, fundada en la constitución química de dichos conglomerantes, es fácil por vía teórica. El cemento portland está constituido por dos silicatos cálcicos (el tricálcico: $SC_3 = SiO_2 \cdot 3CaO$ y el bicálcico: $SC_2 = SiO_2 \cdot 2CaO$), un aluminato (el tricálcico: $AC_3 = Al_2O_3 \cdot 3CaO$) y un ferrito-aluminato (el tetracálcico: $FAC_4 = Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot 4CaO$).

La *velocidad de disolución y de reacción* de los dos silicatos y del aluminato con el agua *aumenta con la temperatura*; la del ferrito-aluminato *disminuye*. En conjunto y en general, dado el escaso contenido de FAC_4 de los cementos, en comparación con los contenidos de los otros constituyentes, el *aumento de temperatura* ejerce una *acción aceleradora* de la hidratación del cemento portland.

En el caso de los cementos siderúrgicos y puzolánicos (a base de portland) la *actividad* de la *escoria* o de la *puzolana* depende de la *alcalinidad* del medio, la cual es proporcionada por la *cal de hidrólisis* de los silicatos, y ésta, como queda expuesto, se forma *más rápidamente* cuanto *mayor* es la temperatura.

En el caso de los cementos no portland (aluminosos o sobresulfatados) ocurren fenómenos especiales que les hacen *no aptos* para los tratamientos térmicos.

Los procesos de hidratación transcurren más rápidamente, por lo tanto, si se aporta calor al sistema reaccionante, ya que la precipitación de hidratos formados por geles microcristalinos constitutivos de la pasta hidratada (a causa del fraguado y del endurecimiento), resulta asimismo acelerada. La aportación del calor puede efectuarse de muy diversas formas.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que el fenómeno de la hidratación es *exotérmico*, esto es, transcurre con desprendimiento del calor (*calor de hidratación*). Este calor puede *disiparse* en el ambiente o *acumularse* en la masa que forma el sistema reaccionante; ambas cosas pueden suceder en muy variada medida, y dar lugar, en circunstancias ideales, a dos situaciones extremas.

La primera corresponde al caso en que el calor de hidratación se disipe *con la misma velocidad* con que se desprende en el proceso. En este caso no hay elevación de la temperatura en el sistema y la hidratación se verifica prácticamente en *condiciones isotérmicas*. No hay, pues, aceleración por efecto térmico.

La segunda corresponde al caso contrario en que el calor no se disipe en absoluto, *acumulándose totalmente* en la masa reaccionante y provocando una *elevación de temperatura* en el sistema. Entonces la hidratación transcurre prácticamente en *condiciones adiabáticas* y el proceso se *autoacelera* por efecto térmico.

En la realidad no se da ninguna de estas dos situaciones extremas, sino otras intermedias más o menos próximas a una cualquiera de ellas, por lo cual, según los casos, habrá que contar también, más o menos, con una cierta acción térmica. Esta es más notoria en el caso de la hidratación del cemento en grandes masas de hormigón con una baja relación de superficie a volumen, tal como sucede en las grandes presas.

En circunstancias normales y para unas condiciones fijadas, la curva de desprendimiento del calor con el tiempo (*calor de hidratación-tiempo*) en una masa de cemento, mortero u hormigón que se hidrata tiene una forma característica (figuras 1, a-I y a-II)*. A ella corresponde en las mismas condiciones una curva *temperatura-tiempo* también ca-

* Los gráficos de las figuras expuestas son meramente esquemáticos.

racterística (figuras 2, a-I y a-II). Las curvas representadas son algo distintas en uno y otro caso, dependiendo de la naturaleza (tipo, clase y calidad) de los conglomerantes. Así, para los *cementos fríos* (de moderado o bajo calor de hidratación), las curvas son más ten-

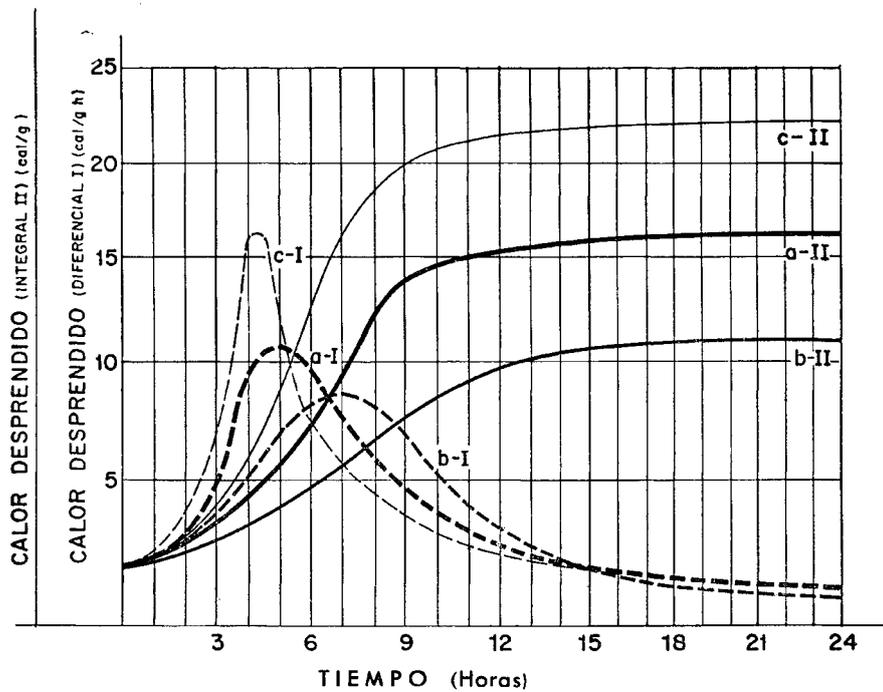


Fig. 1

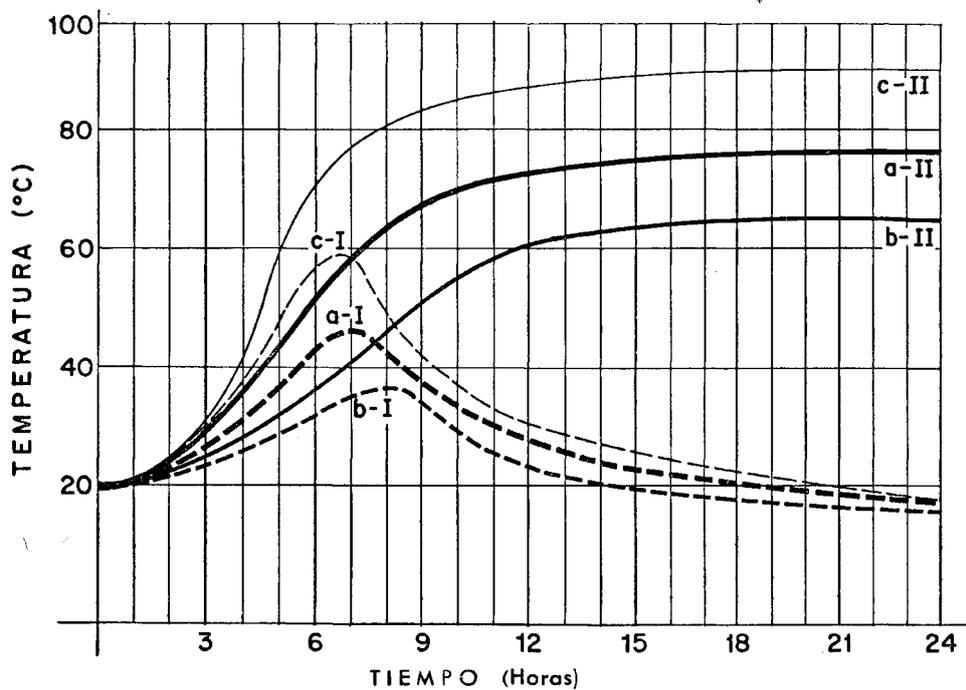


Fig. 2

didas (figuras 1, b-I y b-II, y 2, b-I y b-II), mientras que para *cementos calientes* (de elevado calor de hidratación, ricos en silicato tricálcico y en aluminato tricálcico) las curvas son más abruptas (figuras 1, c-I y c-II, y 2, c-I y c-II). En la figura 1, las curvas II son in-

2. ACELERACION TERMICA DEL FRAGUADO

El tiempo de fraguado se acorta en general al calentar y elevar la temperatura del conglomerante que fragua. Se exceptúan de este comportamiento algunos cementos especiales, entre los cuales se encuentran los *aluminosos* y los *sobresulfatados*.

Los resultados expuestos en lo que sigue, se refieren a *cementos portland* y, a lo sumo, a los constituidos a base de *clinker portland (siderúrgicos y puzolánicos)*.

La acción de la temperatura en el fraguado presenta dos aspectos diferentes: uno, el de la influencia de pequeños cambios espontáneos de la *temperatura ambiente*, y otro, el del efecto de las *temperaturas altas*, provocadas ex profeso.

2.1. Influencia de los cambios de la temperatura ambiente.

Cuando la temperatura ambiente *crece*, se elevan no sólo los valores iniciales, sino también los finales, e incluso los máximos alcanzados por la temperatura del mortero u hormigón a lo largo del proceso de fraguado, con lo cual éste *se adelanta*, sobre todo por lo que respecta a su *final*.

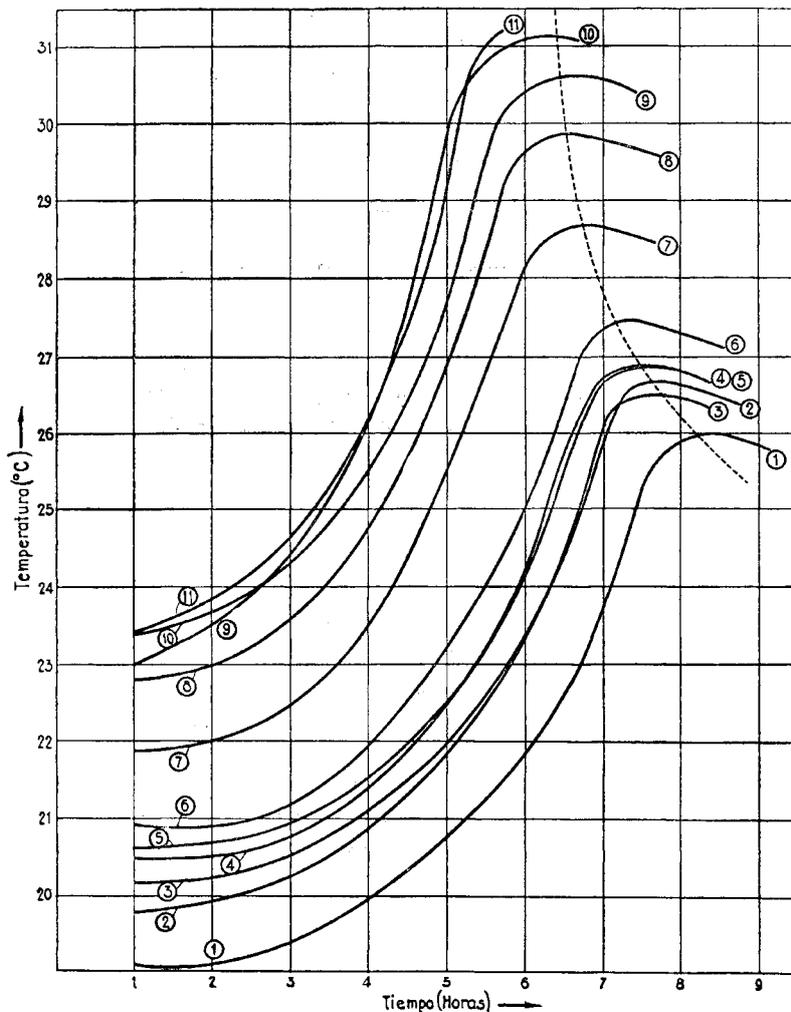


Fig. 3

Así lo ponen de manifiesto los datos del cuadro 1 y las curvas *temperatura-tiempo* del gráfico de la figura 3 (obtenidas en condiciones próximas a las adiabáticas), cuyos máximos, que representan los *finales de fraguado*, se desplazan hacia la izquierda a medida que aumenta la temperatura inicial.

Un ensayo de fraguado, basado en la observación de las características mecánicas del conglomerado, no permite apreciar, por lo menos fácil y cómodamente, estos hechos. Pero con la consideración de variables de naturaleza eléctrica es posible conseguirlo, y así lo demuestran las curvas *resistencia eléctrica-tiempo* en el gráfico de la figura 4, correspondiente a las curvas de la figura 3 y a los datos del cuadro 1: los mínimos de dichas curvas representan los *finales de fraguado* *. Puede apreciarse que, en este caso, un *aumento de 5°C* en las temperaturas, tanto del ambiente como de las probetas, supone un *adelanto de unas dos horas en el final del fraguado*.

Según esto, considerar que un cemento dado tiene el final de fraguado al cabo de tal o cual tiempo en las "condiciones normales" en que ordinariamente se utiliza, tiene menos valor, mientras no se especifique en qué condiciones precisas de temperatura se lleva a cabo la prueba y, a ser posible, de qué magnitud es la acción aceleradora de la temperatura en el fraguado del cemento en cuestión, para intervalos de la misma correspondientes a las condiciones reales más probables de su empleo. Porque, según el clima de la localidad, la época del año, etc., no es difícil encontrarse con variaciones de temperatura

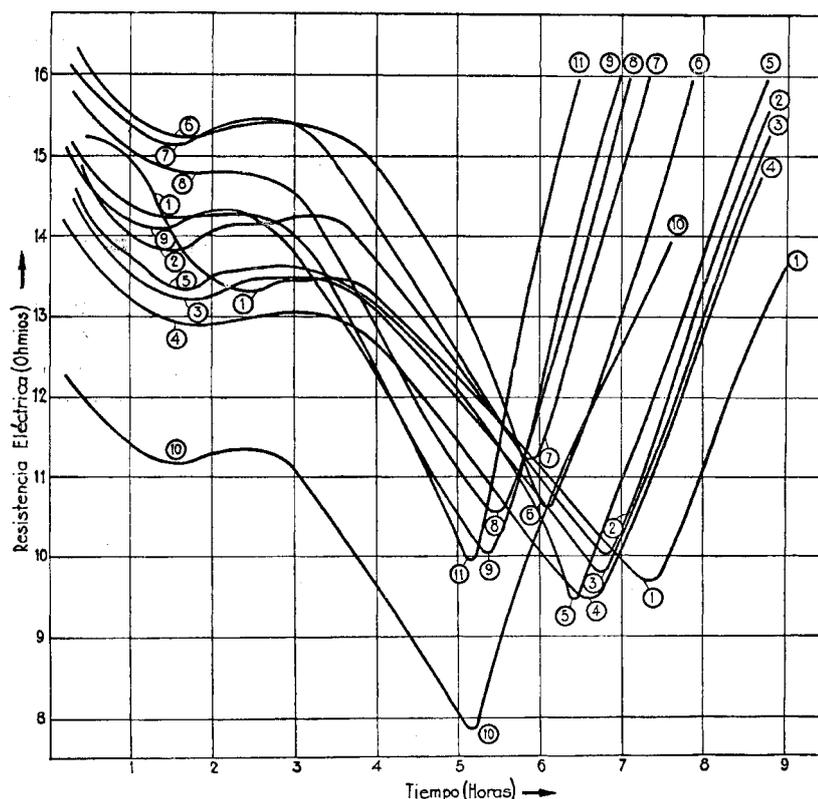


Fig. 4

* J. CALLEJA: "Nuevas Técnicas para el Estudio del Fraguado y Endurecimiento de los Aglomerantes Hidráulicos", *Monografías* núms. 109 (1950) y 134 (1953) del I. E. T. c. c. *Anales Real Soc. Esp. Fis. Quím.*, 48 (9-10) 705-712 (1952).—*Revista de Ciencia Aplicada*, VI (29/6), 506-516 (1952); VII (35/6), 494-505 (1952).

en el ambiente y en el agua de amasado superiores a 5°C, las cuales, según lo expuesto, pueden dar lugar a un adelanto o retardo de dos horas y a veces más en el final del fraguado.

Esto interesa en *prefabricación* (extracción de piezas de los moldes), en *inyecciones* de pastas y morteros, en casos de *retraso en la puesta en obra* de hormigones, etc.

CUADRO I

NUMERO DE LA EXPERIENCIA	TEMPERATURA (°C)						FRAGUADO			
	DEL AMBIENTE			DE LA PROBETA			CURVAS T-t		CURVAS R-t	
	INICIAL	MA-XIMA	FINAL	INICIAL	MA-XIMA	FINAL	PRIN-CIPIO	FIN	PRIN-CIPIO	FIN
1	19,2	19,5	18,9	19,0	26,1	25,9	2,00	8,15	2,00	7,20
2	19,3	20,0	19,2	19,2	26,8	26,5	1,45	7,35	1,45	6,55
3	19,3	19,3	19,2	19,7	26,6	26,4	1,45	7,00	1,45	6,40
4	19,2	20,0	19,6	20,1	26,9	26,7	2,00	7,22	1,45	6,30
5	19,4	20,0	19,6	20,1	26,9	26,7	2,00	7,22	1,45	6,25
6	21,3	20,9	20,5	20,8	27,6	27,3	1,40	7,00	1,30	6,30
7	21,0	22,2	21,3	21,4	28,7	28,4	1,30	6,42	1,30	5,50
8	23,5	23,5	22,6	22,2	29,9	29,6	1,45	6,30	1,30	5,25
9	24,2	24,2	23,0	22,9	30,6	30,4	1,15	6,30	1,20	5,25
10	22,7	24,6	24,0	22,0	31,2	31,0	1,15	6,22	1,30	5,10
11	23,3	25,2	24,3	22,5	31,8	31,1	—	6,20	1,30	5,10

2.2. Influencia de la elevación de temperaturas por encima de los valores normales.

El trazado de las curvas *resistencia eléctrica-tiempo*, permite destacar el efecto acelerador de los aumentos notables de temperatura (figuras 5 a 12), tanto en el *principio p* como sobre todo en el *final f* y en el *intervalo de fraguado i* (figura 13). En algunas de las gráficas (figuras 5 a 9) se incluyen las curvas de fraguado correspondientes a una temperatura ambiente de 23° a 25°C.

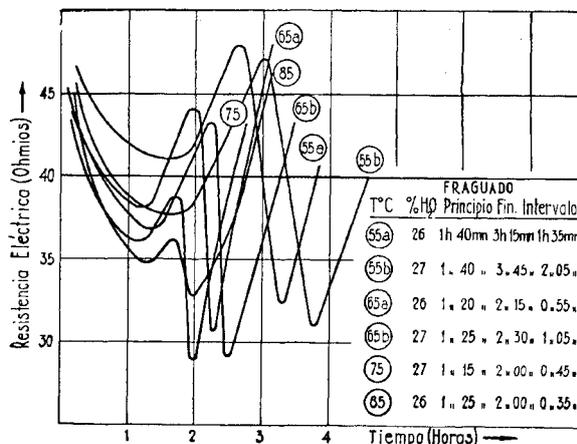


Fig. 5

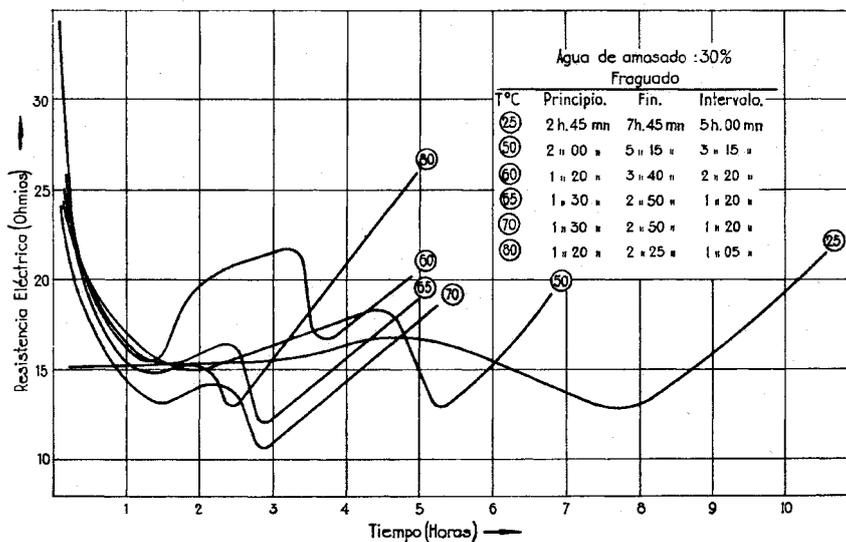


Fig. 6

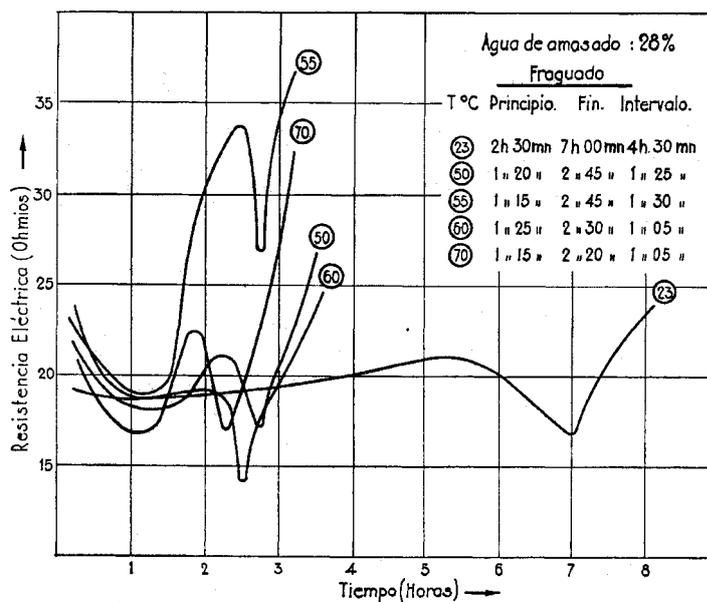


Fig. 7

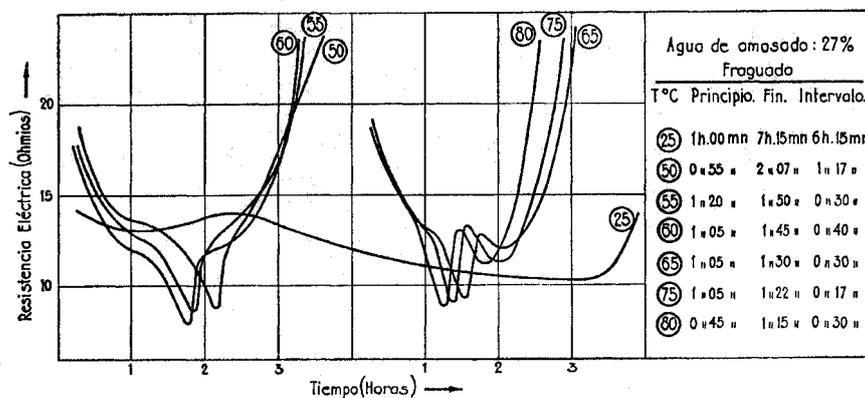


Fig. 8

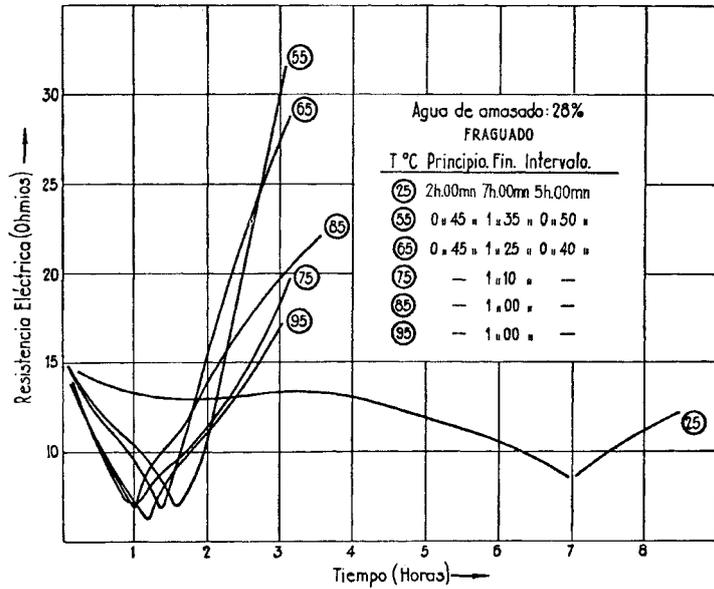


Fig. 9

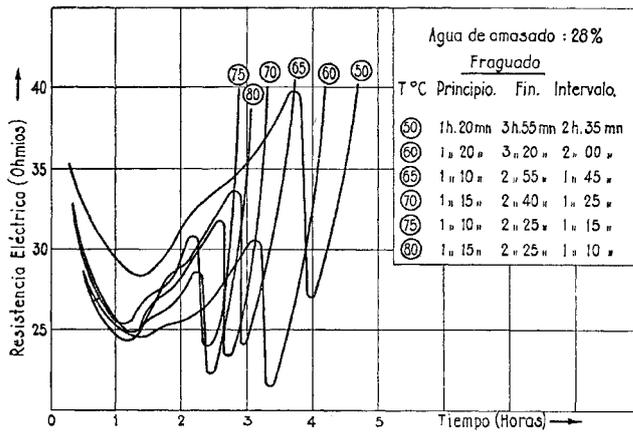


Fig. 10

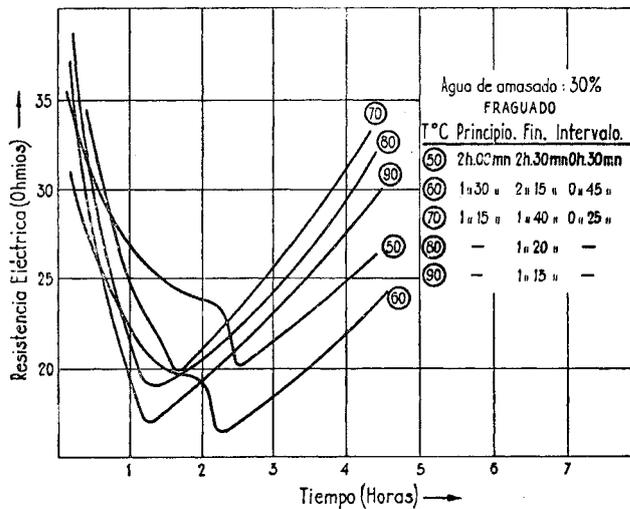


Fig. 11

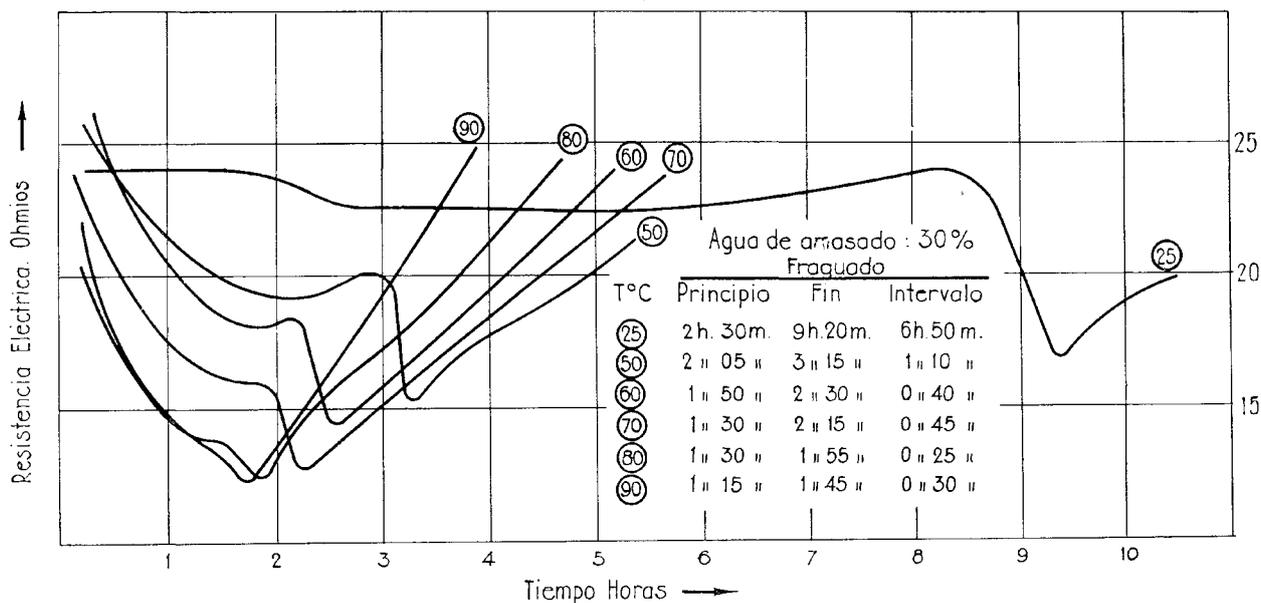


Fig. 12

El efecto acelerador depende de la naturaleza y *composición química* del cemento, y también de su *finura* y de la *cantidad de agua* en la pasta o mortero, pudiéndose establecer con carácter muy amplio y general el hecho de que, para *pastas puras* de cemento portland con una *consistencia normal*, la *elevación* de la temperatura al *doble* de su valor inicial (de 25° a 50°C) supone por término medio un *adelanto del final del fraguado de la mitad* del tiempo necesario para éste (de ocho a cuatro horas), es decir, reduce el tiempo de fraguado a *la mitad*. De otro modo, para una temperatura ambiente *superior a 50°C*, puede conseguirse la *totalidad del fraguado* en un período de tiempo *no superior a cinco horas*, en la generalidad de los casos.

La influencia de la cantidad de agua puede apreciarse en las figuras 5, 14, 15, 16, 17 y 18.

La influencia del aumento de la temperatura en el comienzo del fraguado es menos notoria y, en cuanto al final, los efectos son más destacados en el intervalo de temperaturas comprendido entre 45° y 65°C.

El cuadro general de la acción de la temperatura en el principio y en el final del fraguado puede verse en el gráfico esquemático de la figura 19.

El estudio del fraguado a temperaturas superiores a las normales tiene interés en el caso de los tratamientos térmicos en autoclaves, cámaras o balsas de curado. Si bien los *métodos mecánicos clásicos*, generalmente empleados para detectar el final del fraguado, no pueden ser aplicados para obtener un conocimiento del mismo en tales condiciones, las técnicas de *naturaleza eléctrica* (curvas *resistencia eléctrica-tiempo*), se prestan bien, como queda demostrado, para dicho fin.

Fig. 14

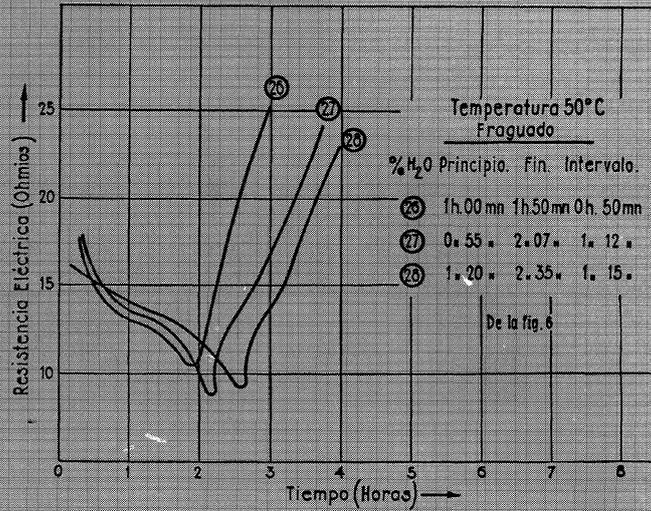


Fig. 15

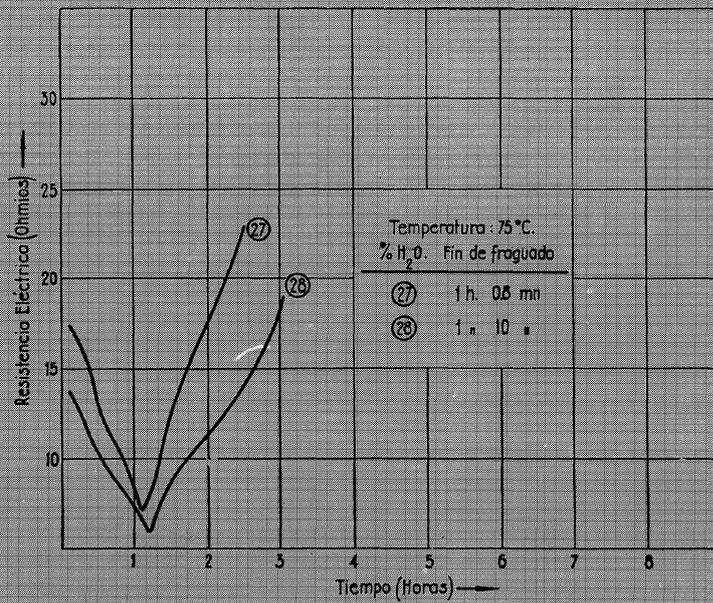
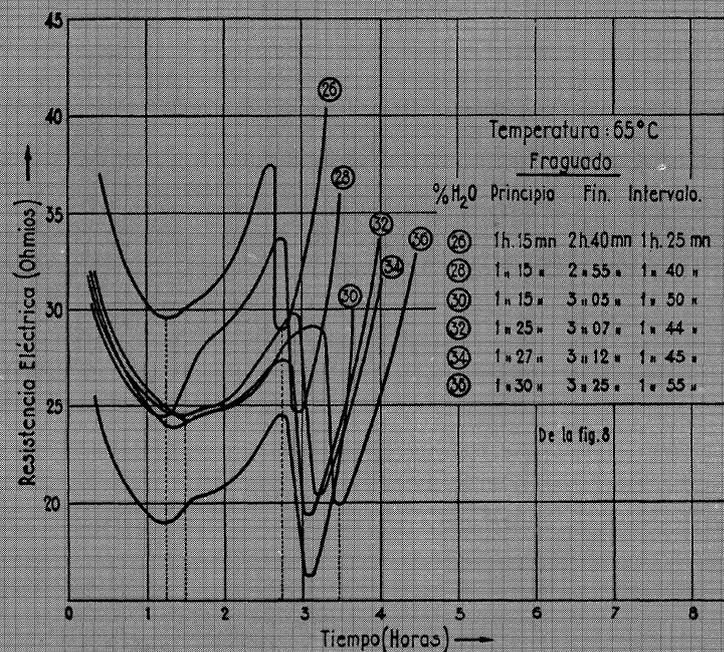


Fig. 16



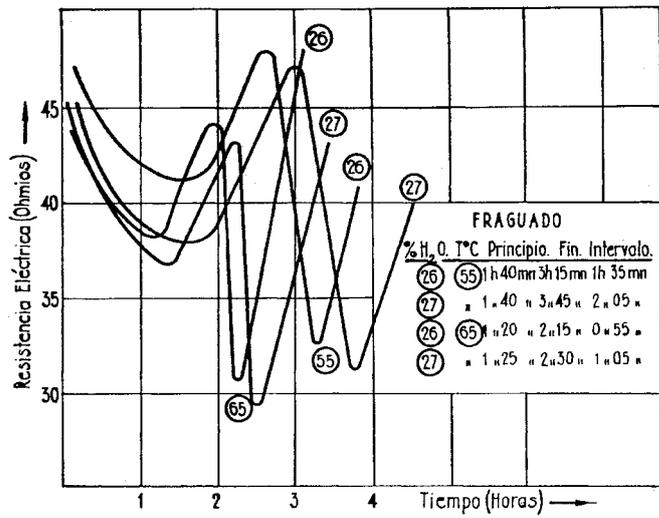


Fig. 17

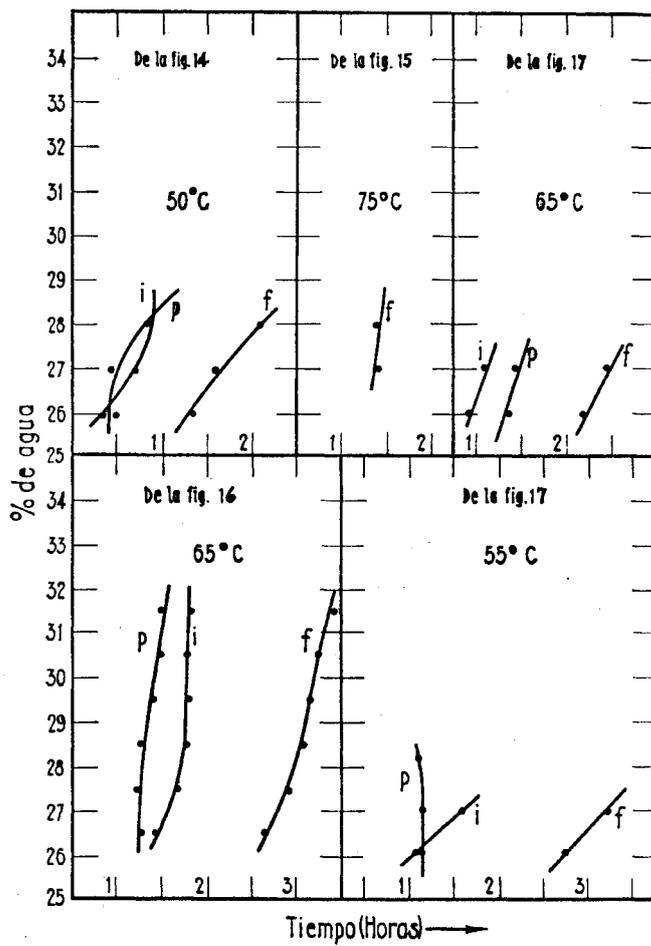


Fig. 18

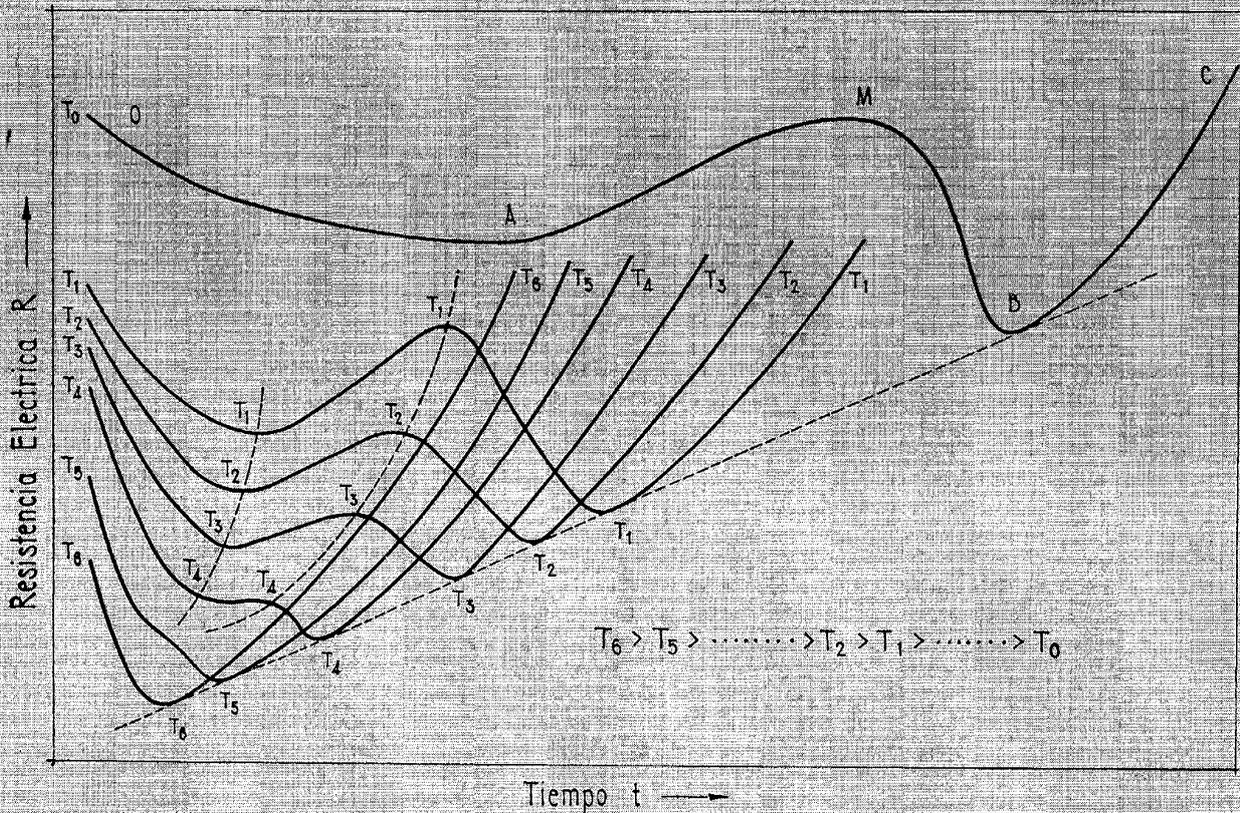


Fig. 19

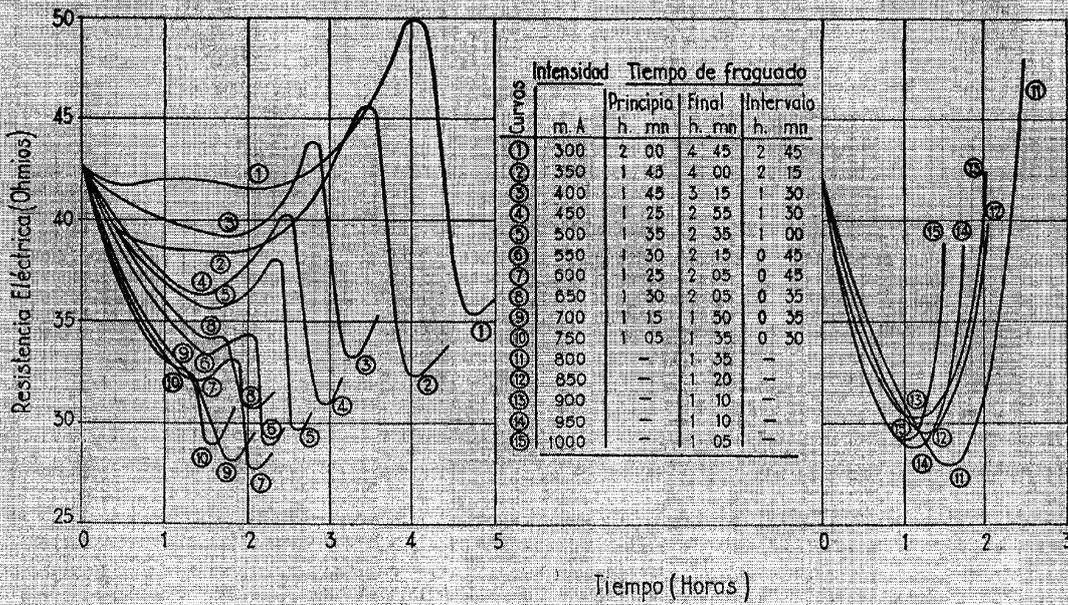


Fig. 20

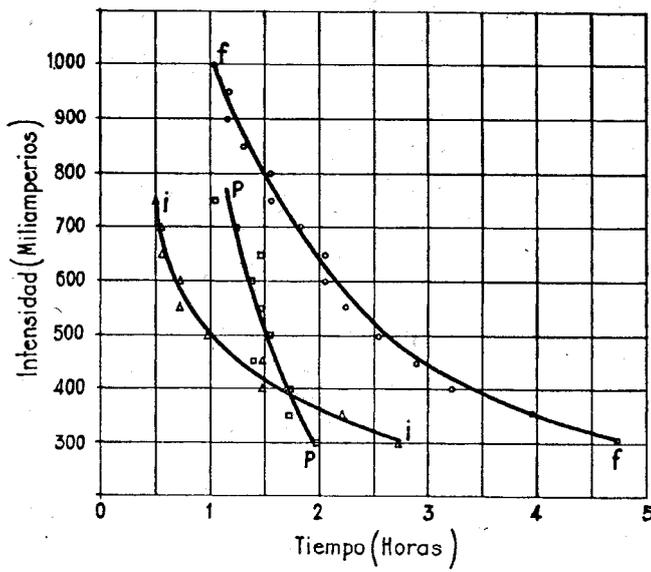


Fig. 21

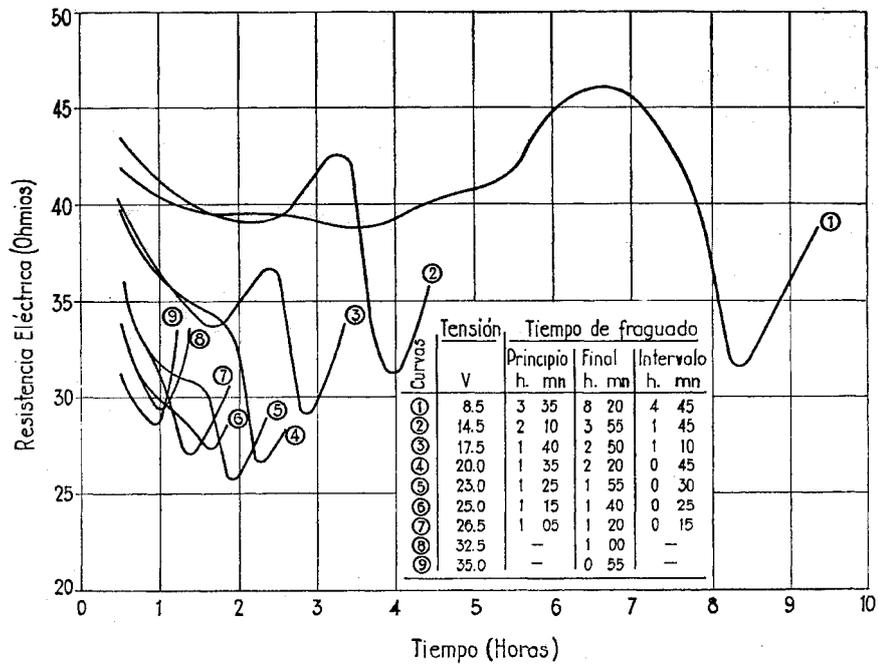


Fig. 22

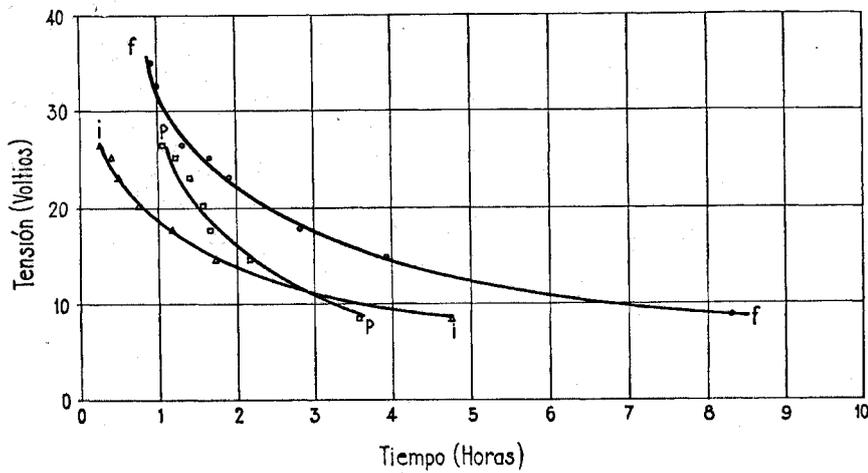


Fig. 23

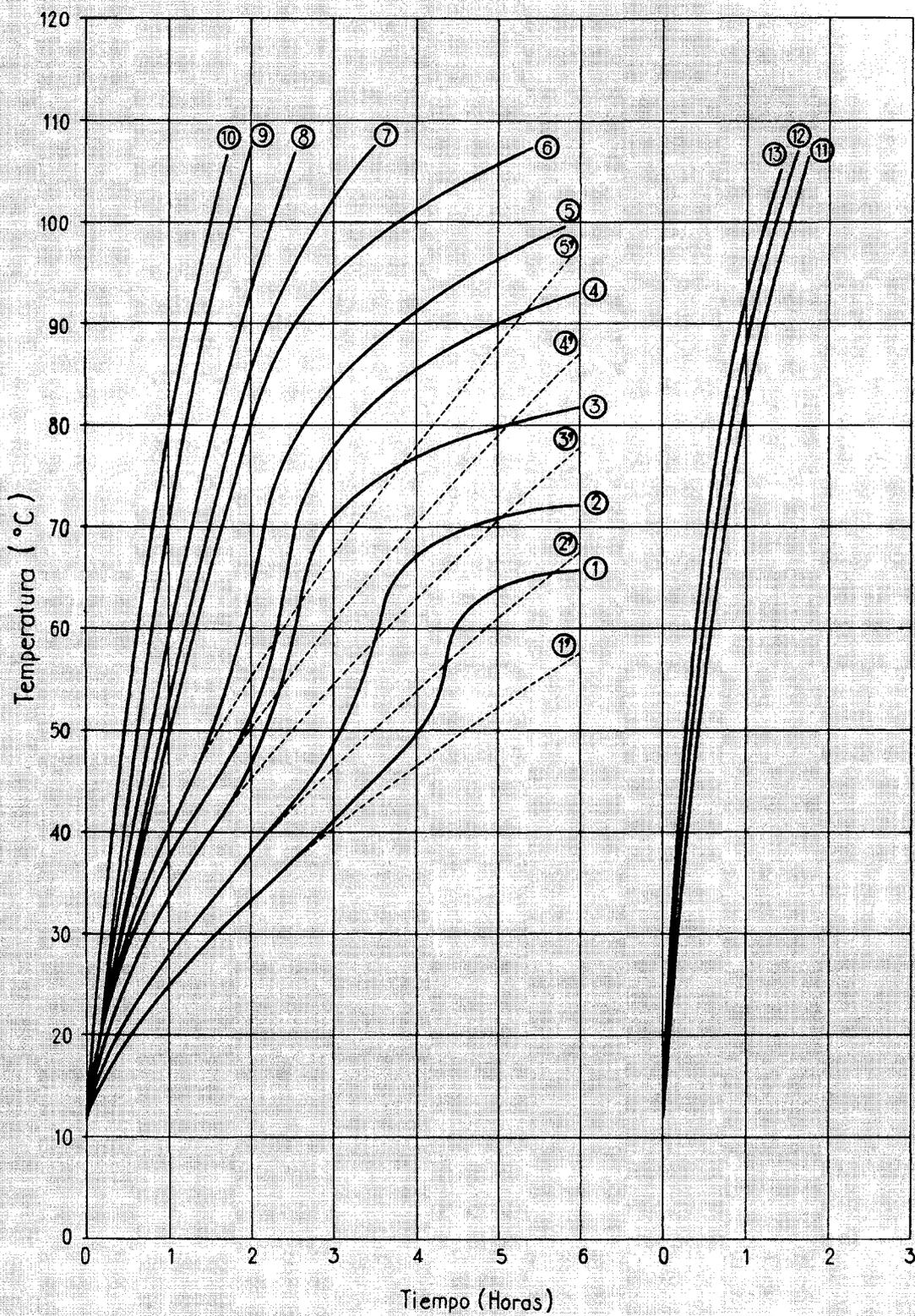


Fig. 24

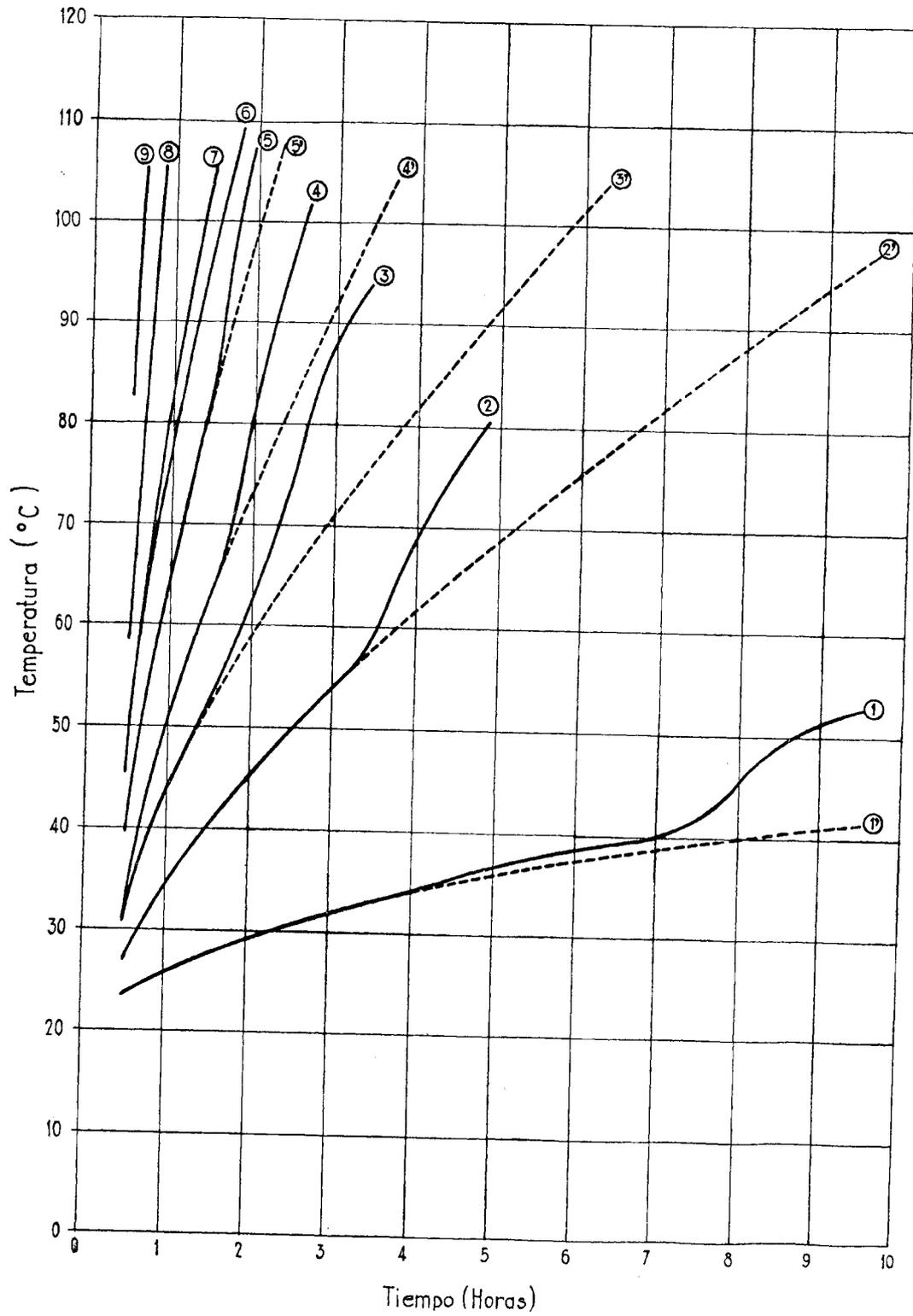


Fig. 25

Igualmente presta esta técnica una ayuda especial cuando la aportación de calor se hace mediante *calefacción eléctrica*, demostrando que los efectos conseguidos son *análogos* a los logrados por otro procedimiento cualquiera de calefacción.

En efecto, en *condiciones casi adiabáticas* las curvas *resistencia eléctrica-tiempo* a *intensidad constante* presentan el aspecto de la figura 20 y los principios, finales e intervalos de fraguado respecto de la intensidad, se sitúan en curvas de la forma indicada en la figura 21; a *tensión constante* las curvas equivalentes son las de las figuras 22 y 23, respectivamente. En cada caso, las curvas *temperatura-tiempo* son del tipo de las representadas en las figuras 24 y 25.

Las conclusiones que pueden deducirse del análisis de estas curvas son las mismas que cuando la calefacción se efectúa por otros medios, de lo cual se infiere que el fraguado acelerado por *efecto Joule* es *cualitativamente análogo* al acelerado por cualquier otro tratamiento térmico, siempre que las condiciones higrométricas del ambiente y del hormigón sean comparables.

(Continuará)