

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

617-42 NUEVAS TECNICAS PARA EL ESTUDIO DEL FRAGUADO Y ENDURECI-
MIENTO DE LOS AGLOMERANTES HIDRAULICOS

IV.- Influencia de la Temperatura en el Fraguado

Por J. Calleja, Doctor en Ciencias

- - -

Resumen

En trabajos anteriores (1) que llevan el mismo título general que el presente, se fijaron las bases para el desarrollo y puesta a punto de una nueva técnica para el estudio del fraguado y endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos, fundada en la marcha de las curvas resistencia eléctrica - tiempo (R-t) de pastas de cemento mantenidas durante el fraguado en condiciones casi adiabáticas. Del estudio de estas curvas, así como de su comparación con las curvas temperatura - tiempo (T-t) durante el proceso, se dedujo que el principio y el fin del fraguado de un aglomerante venían señalados en las curvas R-t por puntos bien definidos.

Se estudió también la influencia que la frecuencia de la corriente utilizada en la medida de la resistencia eléctrica de pastas de cemento ejerce en los resultados obtenidos, concluyéndose que no deben emplearse corrientes de frecuencia inferior a 1000 ciclos.

Finalmente se trató de la aplicabilidad de la técnica al cemento aluminoso, por ser éste distinto de los portland en múltiples aspectos, resultando que para este cemento, la técnica expuesta, como cualquiera de las clásicas, no es aplicable, al menos en la misma forma en que lo es para el portland.

En este artículo se estudia una de las variables más interesantes entre las que intervienen en el fraguado: la temperatura, en dos aspectos. Uno el de la influencia de variaciones ligeras en la temperatura ambiente y en la del agua de amasado, influencia tal, que una variación de 5 °C puede ocasionar a veces adelantos o retrasos de dos horas en el final del fraguado. Otro aspecto es el del fraguado a temperaturas elevadas, cuestión de gran interés para la determinación de la marcha y condiciones óptimas del curado acelerado del hormigón mediante tratamientos térmicos. De los resultados experimentales hallados se da la correspondiente explicación teórica.

(1) Calleja, J., "Últimos Avances en Materiales de Construcción", N° 25 pág. 17 - 24; N° 26, pág. 16 - 27; N° 27, pág. 16 - 24 y N° 31, pág. 13- 25.

1 - INTRODUCCION

Sabido es que el aumento de temperatura acelera los procesos de fraguado y endurecimiento de los aglomerantes, hecho cuyas repercusiones se manifiestan prácticamente en el calentamiento de los áridos y el agua de amasado para los trabajos de hormigonado en tiempo de invierno, y también, y cada vez con más auge, en los tratamientos térmicos aplicados a las piezas de hormigón prefabricado, de cuyo tema va creándose una amplia bibliografía (2).

No es ocasión de citar los numerosos trabajos publicados en relación con el endurecimiento acelerado del hormigón, desde el punto de vista técnico de la prefabricación, tanto por medios químicos (adiciones adecuadas), como por medios físicos y de modo especial por el empleo de altas temperaturas, bien utilizando el vapor libre, bien a presión, o bien por medio de calefacción eléctrica por efecto Joule.

Del problema enfocado desde el mencionado punto de vista técnico habremos de ocuparnos con todo detalle en otra ocasión, limitándonos aquí a consignar que en la cita (2) puede hallarse la literatura más importante acerca del tema, hasta el año 1951.

Ciñéndonos al estudio de la influencia de la temperatura en el fraguado hay que hacer constar que Brocard ha estudiado la aceleración del fraguado (y también del endurecimiento) de los aglomerantes hidráulicos por el calor (3) haciendo extensivo

(2) Cement and Concrete Association Library Record, Ch. 6 (10/51)

(3) Brocard, J., Ann. Inst. Téch. Bât. Trav. Pub., Nº 54 dic. 1948

el estudio, no sólo al cemento portland ordinario, sino también a los supercementos, a los cementos de escorias, a los aluminosos, a los artificiales rápidos y a los supersulfatados. Salvo en el caso de los tres citados en último lugar, el tiempo de fraguado se acorta en los demás al elevarse la temperatura.

Las técnicas clásicas aplicadas al estudio del fraguado y endurecimiento de los aligerantes hidráulicos resultan insuficientes, no ya para la determinación del comienzo, final y duración del proceso de fraguado, como ya se indicó en otro lugar (4), sino también y de modo especial para el estudio de las variables que afectan tanto a aquel fenómeno como al del endurecimiento. De entre estas variables una de las más interesantes, por lo ya dicho, es la temperatura.

Su estudio mediante el empleo de técnicas adecuadas - que se apartan de las clásicas es tan fácil como difícil resulta con éstas y así lo reconoció Shimizu (5) al aplicar las medidas de conductividad eléctrica de las pastas de cemento a la obtención de un haz de isotermas conductividad-tiempo durante el fraguado.

Utilizando nuestra técnica (4) (6) nos proponemos estudiar la influencia de la temperatura como agente acelerador -

(4) Calleja, J., "Ultimos Avances en Materiales de Construcción", nº 25, pág. 17-24 y nº 26, pág. 16-27.

(5) Shimizu, Y., Concrete Cements, mayo 1928, pág. 111 y mayo - 1929, pág. 109.

(6) Calleja, J., "Ultimos Avances en Materiales de Construcción", nº 27 pág. 16-24.

de los procesos de fraguado y endurecimiento, según ya se anunció (6), limitándonos en esta comunicación a los primeros, y considerando dos aspectos: uno, la influencia que a igualdad de otras circunstancias experimentales, tienen en el fraguado las variaciones ordinarias de las condiciones del ambiente, particularmente por lo que a la temperatura se refiere. Otro aspecto es el de la influencia que ejerce en el fraguado las temperaturas notablemente superiores a las normales.

2 - PARTE EXPERIMENTAL

a) Técnica y Detalles Experimentales

Para la parte señalada como primera de este estudio - se utilizó en un todo la técnica ya descrita (4) (6) (7), trabajando con pastas puras de un mismo cemento, en condiciones casi adiabáticas. El periodo de tiempo en que se realizaron las experiencias fué tal que en el varió la temperatura del ambiente entre límites aproximados de 20 y 25°C, es decir, mostrando un campo de variación de unos 5°C. La temperatura del agua de amasado varió en forma paralela. Las restantes condiciones experimentales, tales como el tanto por ciento de agua de amasado, etc., se mantuvieron constantes en todos los casos. Se determinó en cada experiencia el comienzo y el final del fraguado, tanto mediante el trazado de las curvas resistencia eléctrica tiempo (R-t),

(7) Calleja, L., "Ultimos Avances en Materiales de Construcción", nº 31, pág. 13-25.

como de las curvas temperatura-tiempo (T-t). Asimismo se anotaron las temperaturas inicial, máxima y final, tanto del ambiente como de la probeta en las condiciones casi adiabáticas, durante cada ensayo.

En la parte de este trabajo señalada como segunda, es decir, en el estudio de la influencia en el tiempo de fraguado, de temperaturas superiores a la normal, se determinaron las curvas R-t para ocho cementos portland españoles de distinta procedencia, señalándose a partir de ellas el principio, fin e intervalo de fraguado en cada caso.

Se trabajó a temperaturas comprendidas entre 50 y 100°C introduciendo la pasta amasada y enmoldada en una estufa termostática, previamente ajustada y mantenida después, a lo largo de toda la experiencia, a la temperatura correspondiente en cada caso. Dentro de la estufa se mantenía a lo largo de cada experiencia un recipiente con agua para asegurar un ambiente de humedad en el recinto de la estufa.

El porcentaje de agua de amasado fué el mismo para cada cemento, a saber, el preciso para obtener una pasta de consistencia normal, según el ensayo de Tetmajer, salvo en algún caso en que incidentalmente se hizo variar, para una temperatura de trabajo dada, con objeto de observar la influencia de esta variación.

Es de advertir que las temperaturas señaladas no son las de las probetas, sino las del recinto de la estufa, ya que las de aquellas no pudieron ser constantes por precisar un cierto tiempo para igualarlas de la estufa, rebasándolas después -

por el calor desprendido en el fraguado.

b) Resultados

I) Influencia de las variaciones de temperatura ambiente en el fraguado.

Refiriéndonos a la primera parte de este trabajo, los resultados experimentales son los indicados en la tabla 1, complemento de la cual son los gráficos de las figuras 1 y 2.

TABLA I

Nº de la experiencia	Temperatura °C						Fraguado			
	Del ambiente			De la probeta			Curvas T-t		Curvas R-t	
	Inicial	máxima	final	Inicial	máxima	final	principio	fin	principio	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

Los datos de la tabla indican que, a medida que la temperatura ambiente crece (particularmente en lo que a sus valores máximos y finales se refiere), crecen también los valores de la temperatura inicial, máxima y final de la probeta de un mismo cemento, en unas condiciones experimentales dadas.

Paralelamente el final del fraguado se adelanta, tanto el determinado por las curvas T-t como el deducido de las R-t. -

El principio de fraguado también manifiesta una tendencia a adelantarse, aunque no es tan clara como para el final, particularmente en el caso de las curvas T-t. El retraso que estas manifiestan respecto del final señalado por las R-t obedece a la causa ya señalada en otra ocasión (4), es decir, a la inercia de que va afectado el alcance del equilibrio térmico entre la masa que fragua y el artificio para la medida de la temperatura. Dicha inercia y, en consecuencia, el valor de dicho retraso, puede depender de las condiciones experimentales.

Observando los resultados de las experiencias extremas 1 y 11 se aprecia que una diferencia de unos 5°C en las temperaturas, tanto del ambiente como de las probetas, causa un adelanto de una hora en el principio del fraguado y dos horas en el final, aproximadamente, tanto según las curvas T-t como según las curvas R-t.

Las curvas de las figuras 1 y 2 indican claramente el adelanto del final del fraguado, es decir, el desplazamiento hacia la izquierda de los máximos de las curvas T-t y de los mínimos de las R-t a medida que son mayores las temperaturas, tanto del ambiente como de las probetas, según consta también en los valores de la tabla.

Los distintos valores absolutos de la resistencia eléctrica, es decir, el desplazamiento de las curvas R-t en la Fig. 2, hacia arriba o hacia abajo, se deben a los distintos valores de la frecuencia utilizada en las medidas de R, conforme en un todo a los resultados expuestos en un trabajo anterior (6).

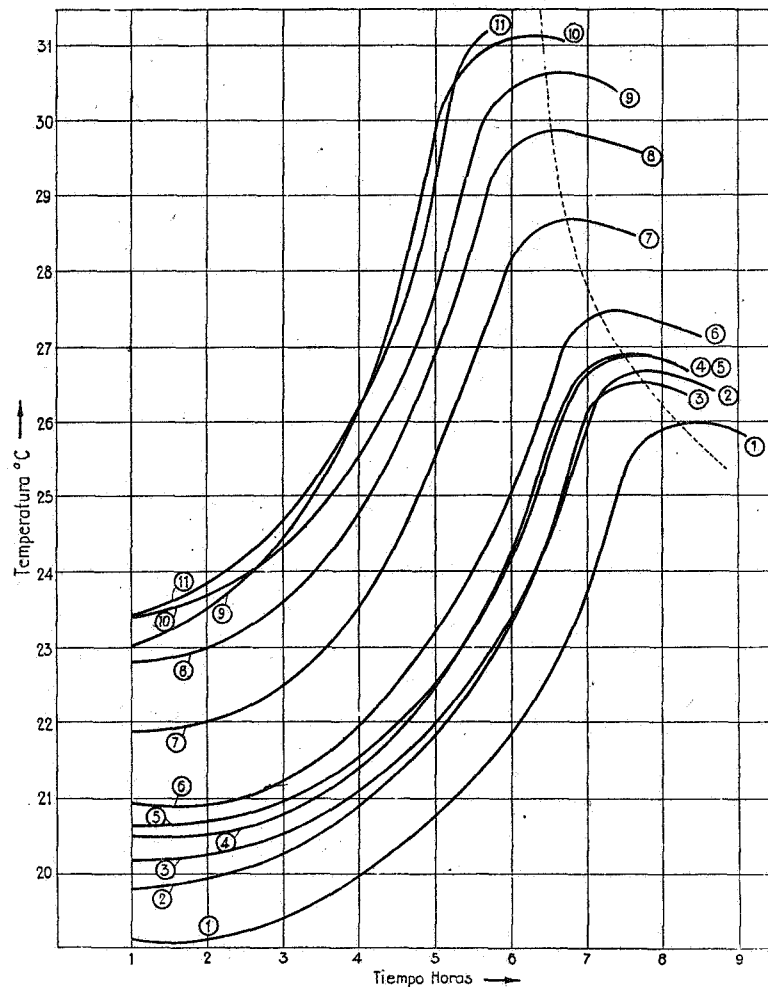


Fig. 1.

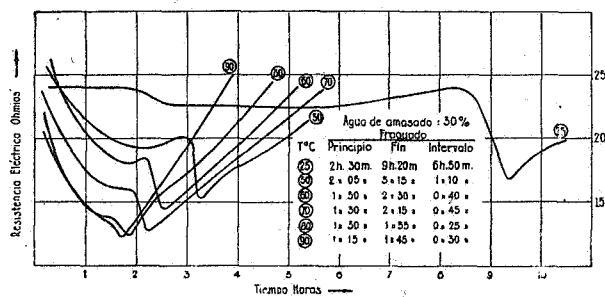


Fig. 3.

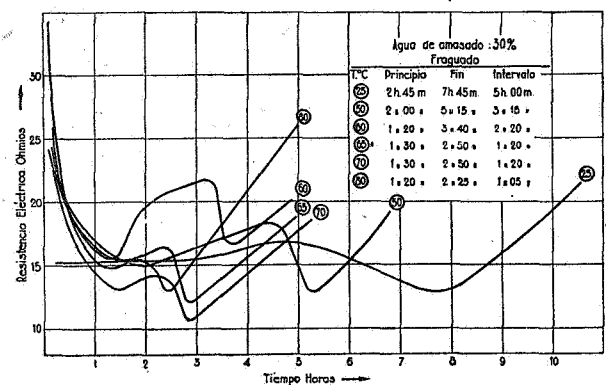


Fig. 4.

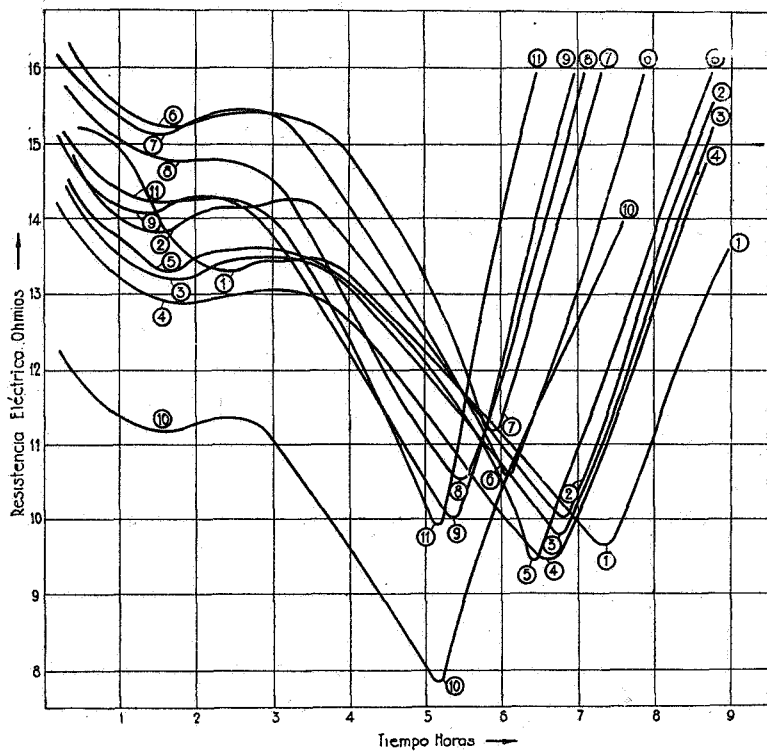


Fig. 2.

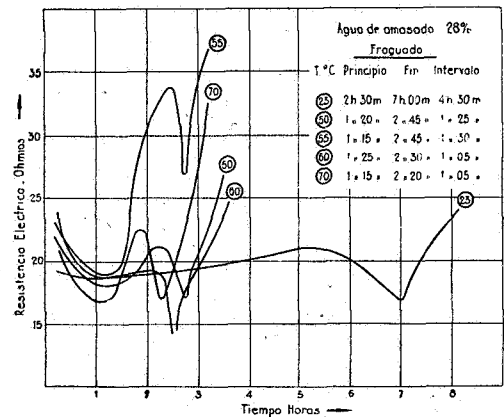


Fig. 5.

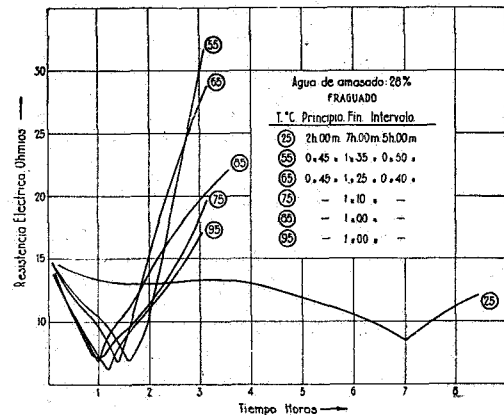


Fig. 7.

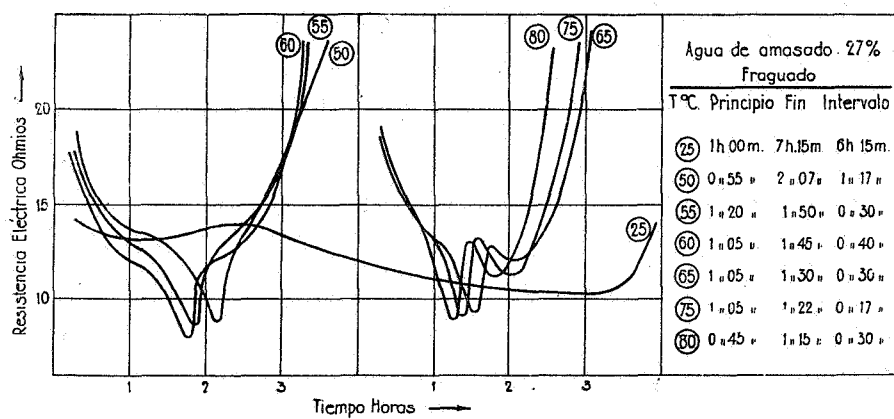


Fig. 6.

II) Influencia de las temperaturas elevadas en el fraguado.

Los resultados relativos a la segunda parte del trabajo es decir, el estudio de la influencia en el fraguado de temperaturas superiores a las normales, están dados, Para los ocho cementos españoles estudiados, en los gráficos de las figuras 3 a 10, ambas inclusive, en las que se señalan también los cuadros de valores correspondientes al principio, fin e intervalo de fraguado, a las distintas temperaturas indicadas, deducidos de las correspondientes curvas experimentales.

Todas las figuras se refieren a cementos portland ordinarios, excepto la 9 que corresponde a un cemento blanco, pese a lo cual las curvas que en ella se señalan son muy análogas a las de la 8, indicando el comportamiento paralelo del cemento blanco con relación a ciertos portland, por cuanto a la marcha de su fraguado respecto de la temperatura se refiere.

Las figuras 3 a 7 presentan, junto a las curvas R-t de fraguado a temperaturas superiores a la normal, las curvas obtenidas a esta temperatura, considerando como tal la de 25°C, aproximadamente.

En ellas puede apreciarse la contracción de las curvas R-t a medida que aumenta la temperatura, es decir, el desplazamiento hacia la izquierda de los mínimos que señalan el final del fraguado, de igual modo que se aprecia en la fig. 2, aunque de forma más acusada que en aquel caso.

Análogamente se observa en general, cuando la variación de alguna condición experimental secundaria no lo enmascara, que

las curvas R-t, si bien a veces se entrecruzan, tienden a situar se unas debajo de otras a medida que la temperatura a que corresponden crece.

La contracción de las curvas R-t es de tal naturaleza - que los máximos característicos de ellas, así como los primeros mínimos que señalan el comienzo del fraguado, van esfumándose - progresiva y paulatinamente a medida que se eleva la temperatura llegando a desaparecer por completo en algún caso. Tal puede - apreciarse en los gráficos de las figuras 3, 7, 8, 9 y 10 y particularmente en los de las 3 y 10.

El mayor o menor relieve de este efecto depende naturalmente de la temperatura y, para un margen de temperatura dado, del tipo de cemento, como es bien notorio.

Ello quiere decir que, para determinados cementos y - valores de la temperatura, es posible que desaparezca en las curvas R-t el primer mínimo que señala el comienzo del fraguado, - apareciendo sólo el segundo, correspondiente al final del mismo.

La posición de este segundo mínimo nos indica que no todos los cementos portland experimentan la misma aceleración - en su fraguado por efecto de la temperatura, como lo indican los gráficos expuestos, pero manejando cifras medias deducidas de - ellos puede decirse, para fijar ideas, que si un cemento tiene su final de fraguado alrededor de las 8 horas en condiciones - normales, es decir, a temperatura ambiente de 25°C, a 50°C lo - tiene ya a las 4 horas aproximadamente, es decir, fragua en la mitad de tiempo.

Las relaciones entre temperatura y comienzo, final e

intervalo de fraguado para cada uno de los cementos representados en las figuras 3 a 10, están señaladas globalmente en los gráficos de la figura 11, en cada uno de los cuales se indica mediante p , f , i , las curvas de los principios, finales e intervalos de fraguado en función de las temperaturas. Se señala también en ellos la figura a la que corresponde el gráfico y la tabla con cuyos datos se han trazado las citadas curvas.

La figura 11 indica una vez más, y con mayor claridad, la distinta susceptibilidad a la temperatura, por encima de 50°C , de los ocho diferentes portland (incluido uno blanco), estudiados.

Aparte de esto, son dignos de señalar algunos otros puntos. En primer lugar, que la elevación de temperatura parece influir poco en el comienzo del fraguado, ya que en varios de los ocho casos estudiados las curvas p son rectas casi normales al eje de abscisas (tiempos), en su totalidad o en parte, o con poca inclinación. En los casos en que la influencia de la temperatura por encima de 50°C es notoria, sólo lo es hasta los $60 - 65^{\circ}\text{C}$, y deja de serlo a temperaturas superiores.

En segundo lugar, que el final del fraguado sí es sensible a la temperatura, y más también en el intervalo $50-60^{\circ}\text{C}$, -acusándose menos tal sensibilidad de 65°C en adelante, como indican en la mayoría de los casos las curvas f .

Las curvas i trazadas con las diferencias entre los valores de las p y f , siguen la marcha que cabe esperar de ello y muestran que en todo caso se acorta el intervalo de fraguado a medida que la temperatura crece por encima de 50°C , siendo ma

por el acortamiento, en general, entre los límites 50 - 65°C.

Todos estos resultados confirman y amplían los señalados en la tabla 1 y figura 2.

Los cementos portland estudiados, de procedencias bien distintas, permiten tal vez generalizar, con las restricciones que sean del caso, y decir que, para una temperatura ambiente - de 50°C o mayor, puede conseguirse la totalidad del fraguado en un periodo de tiempo no superior a las 5 horas. En algunos casos este periodo puede quedar reducido a 2 horas.

La figura 12 muestra la perfecta reproducibilidad que se consigue con la técnica de las curvas R-t aplicada al estudio de la influencia de la temperatura en el fraguado. En ella se dan cuatro curvas correspondientes a cuatro experiencias distintas llevadas a cabo con un mismo cemento a temperatura de 50°C y en las condiciones experimentales generales que se han señalado. Este cemento es de los que ya a 50°C dejan de presentar el primer mínimo correspondiente al comienzo del fraguado y, el segundo, correspondiente al final, que es el que aparece, indica en los cuatro casos, que aquel tiene lugar al cabo de 1 hora y 45 minutos.

III) Influencia del agua de amasado

Incidentalmente se estudió también, en algún caso, la influencia que una variación moderada en el porcentaje de agua de amasado tiene en el tiempo de fraguado, con porcentajes de agua algo superiores o inferiores al correspondiente a una consistencia normal de la pasta, según el ensayo de la sonda de Tetmajer.

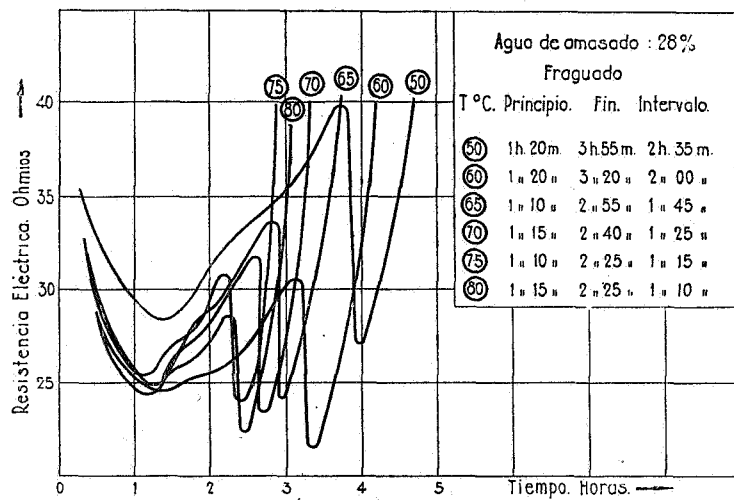


Fig. 8.

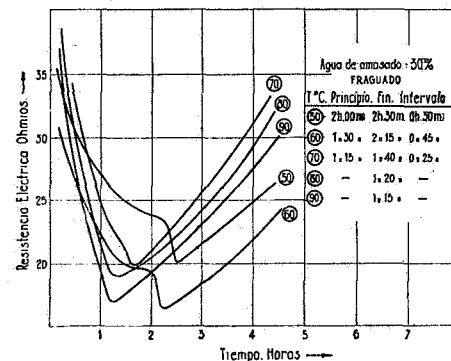


Fig. 10.

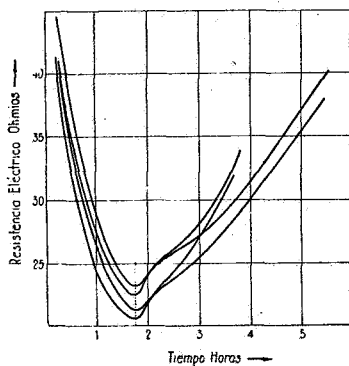


Fig. 12.

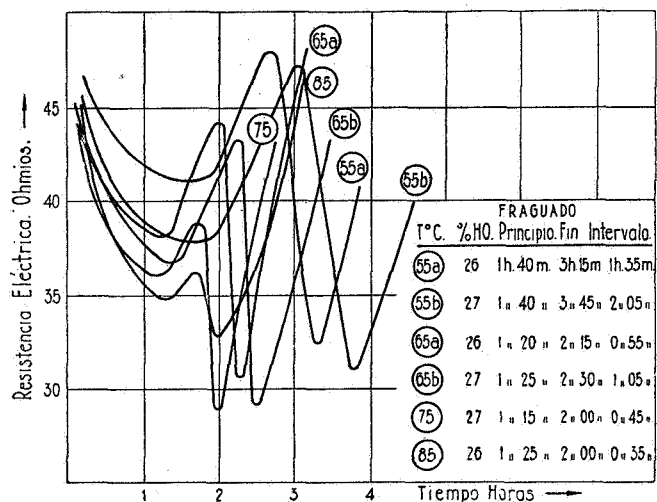


Fig. 9.

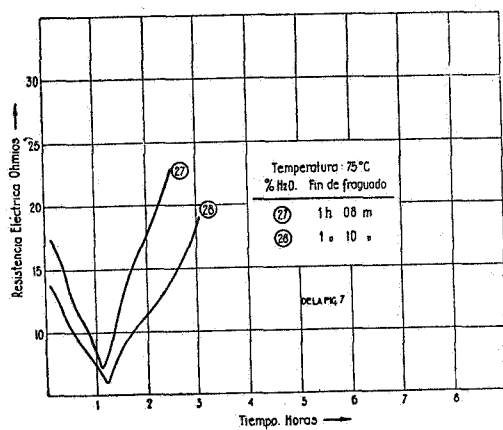


Fig. 14.

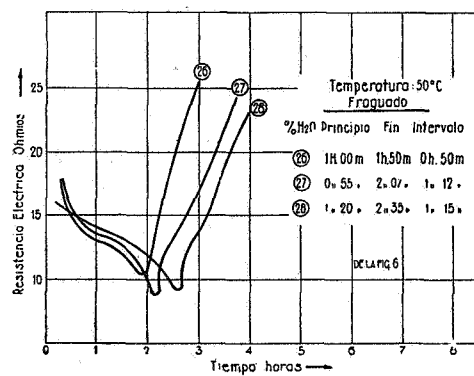


Fig. 13.

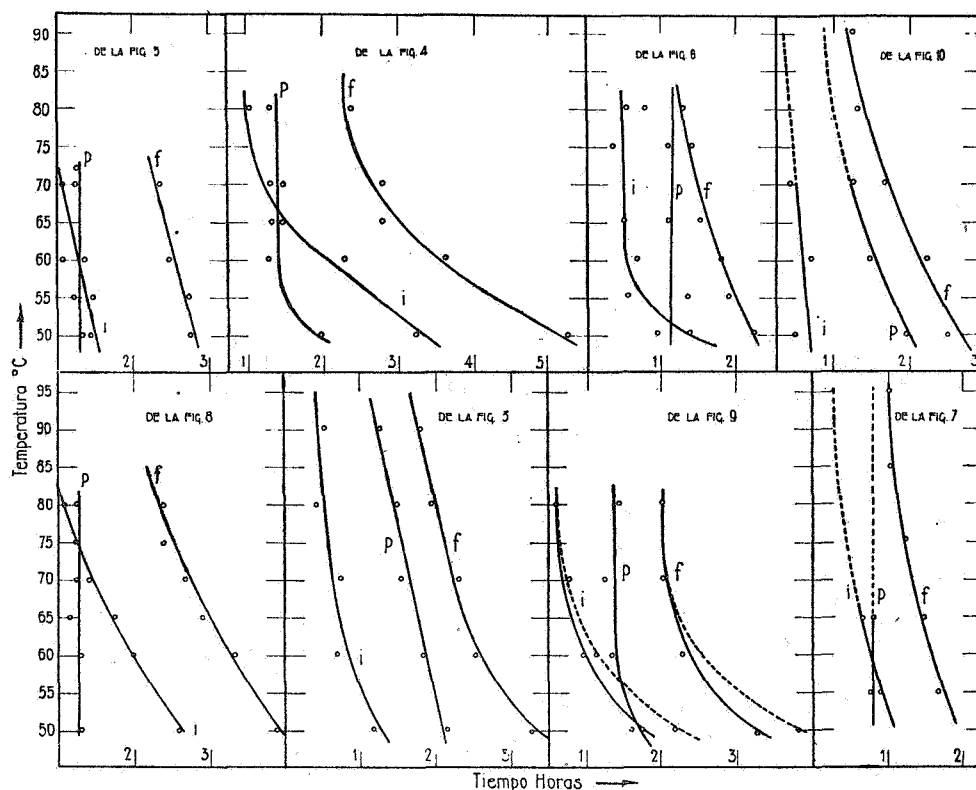


Fig. 11.

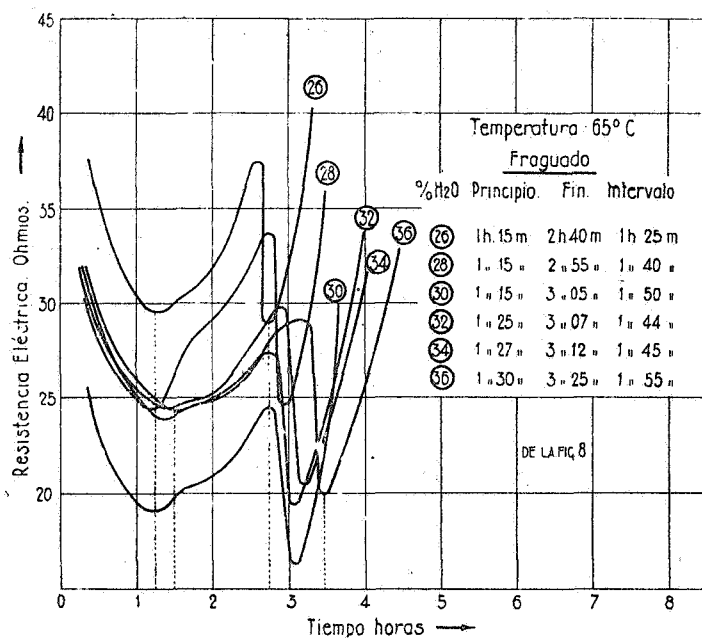


Fig. 15.

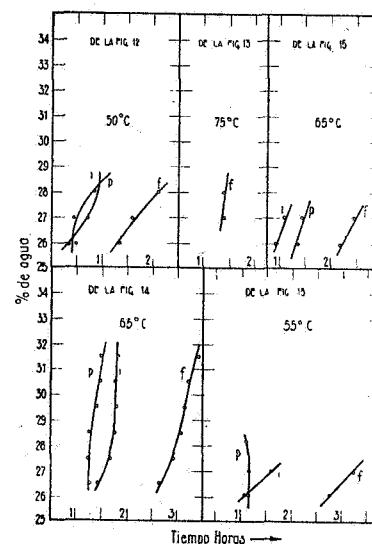


Fig. 17.

Los resultados individuales quedan indicados en los -
gráficos de las figuras 13, 14, 15, 16 correspondientes a los mis-
mos cementos con que se obtuvieron las curvas de las figuras 6, -
7, 8 y 9, respectivamente.

La figura 17 muestra el conjunto de estos resultados y
de ella puede deducirse que, en general, un aumento de la propor-
ción de agua de amasado retrasa tanto el principio como el final
del fraguado, afectando más al final que al principio, y dependien-
do de la magnitud del efecto, del cemento considerado en cada caso.

Paroco deducirse también, que el retraso producido por
un aumento del porcentaje de agua es tanto menos notorio, por lo
que al final del fraguado se refiere, cuanto mayor es la tempera-
tura.

Se observa asimismo que, en general, cuanto mayor es -
el porcentaje de agua de amasado, a las distintas temperaturas y
para los diferentes cementos estudiados, menor es el valor de la
resistencia eléctrica al cabo de un tiempo dado, tanto en las -
primeras como en las segundas ramas de las curvas R-t separadas
por el mínimo que marca el final del fraguado.

Con porcentajes de agua crecientes es también menor la
inclinación de las segundas ramas, después del mínimo.

Todo esto es fácilmente observable cuando todas las -
restantes condiciones experimentales son idénticas para las expe-
riencias cuyos resultados tratan de compararse, pues, como queda
indicado anteriormente, si alguna de estas condiciones experimen-
tales varía, como por ejemplo la distancia entre los electrodos
que sirven para la medida de la resistencia eléctrica, aunque -

tal variación parezca insignificante, puede enmascarar los resultados.

La insuficiencia de datos, por el momento, no permite hacer ninguna afirmación categórica, en especial por lo que respecta a la influencia del porcentaje de agua de amasado en el comienzo de fraguado.

3 - INTERPRETACION Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Al determinar el tiempo de fraguado de un cemento - (principio, fin e intervalo), rara vez se tiene en cuenta la temperatura del agua de amasado y la del ambiente en que se mantiene la pasta amasada, sobre todo cuanto de tales determinaciones se trata de deducir datos de interés exclusivamente técnico.

Sin embargo, los resultados que a tal respecto han sido expuestos en lo que antecede, indican la importancia que dentro del terreno técnico tienen, o pueden tener para un cemento dado, las condiciones del amasado y del ambiente de conservación de la pasta, por lo que a la temperatura se refiere.

Hablar de que un cemento dado tiene el final del fraguado al cabo de tal o cual tiempo, en las condiciones en que ordinariamente se realiza este ensayo, es de escaso valor mientras no se especifique en qué condiciones de temperatura de lleva a cabo la prueba y, a ser posible, de que magnitud es la acción aceleradora de la temperatura en el fraguado del cemento en cuestión, en un intervalo de la misma correspondiente a las condiciones reales más probable de su empleo. Porque según el clima

de la localidad, época del año, etc., no es difícil encontrarse con variaciones de temperatura, no ya en el ambiente, sino también en el agua de amasado, superiores a 5°C y, según lo expuesto, un aumento o una disminución de tal magnitud puede dar lugar a un adelanto o retardo de alrededor de dos horas, y en casos más, en el final del fraguado, respectivamente.

Esto tiene interés tanto técnico como económico puesto que del tiempo que un hormigón tarde en fraguar y después en endurecer, depende el que se pueda desencofrar antes o después y, en consecuencia, de que una obra progrese con mayor o menor ritmo y economía.

Por otra parte, el estudio del fraguado y de las condiciones del mismo, a temperaturas superiores a las normales, - tiene también un interés primordial, cada día más acusado en el campo de la técnica, como medio de conocer las condiciones más adecuadas en que un mortero u hormigón dados han de ser sometidos a un tratamiento térmico para acelerar el desarrollo de su resistencia y demás propiedades mecánicas, de forma tal que un desarrollo acelerado de las mismas a corto plazo no lleve consigo una caída de valores a plazos medianamente largos.

La técnica que ya quedó establecida (4) y que se ha - utilizado a lo largo de este trabajo, permite mejor que ninguna de las empleadas hasta la fecha, su aplicación al estudio y control del fraguado y endurecimiento de morteros y hormigones en cámaras de curado en que se hace uso de altas temperaturas. Su interés rebasa, por tanto, los límites del campo teórico y de - ello habremos de ocuparnos con detalle en otra ocasión.

Trataremos, en lo que sigue, de dar interpretación a la marcha de las curvas R-t obtenidas en el desarrollo experimental de este trabajo, operando a temperaturas superiores a las normales.

Para ello nos remitimos en primer lugar a la discusión de los resultados de un trabajo anterior (4) en que se establecía la forma típica de las curvas R-t correspondientes al fraguado de un cemento. Dicha forma es la representada por la curva T_0 de la figura 18, para una temperatura normal de 25°C.

El primer mínimo A de la curva R-t marca el comienzo del fraguado y coincide en el tiempo con el punto en que las curvas temperatura-tiempo (T-t) señalan el principio de un crecimiento sostenido de la temperatura durante el proceso.

El tramo O-A de la curva corresponde a la disolución en el agua de amasado de los componentes más solubles del cemento y, en consecuencia, al aumentar con el tiempo la concentración de la disolución, aumenta la conductividad y disminuye la resistencia eléctrica hasta alcanzar su valor mínimo en A. Hasta aquí las modificaciones experimentadas por la fase sólida de la pasta son prácticamente nulas.

A partir de A tiene lugar el fraguado con el correspondiente aumento de la temperatura. Esta tiende a elevar la conductividad de la disolución, puesto que reduce la viscosidad de la misma, con el consiguiente aumento de la movilidad iónica. En consecuencia, la resistencia eléctrica en la disolución tiende a disminuir. Por otra parte, si la pasta se comporta como un sólido semiconductor (3), (7), también el aumento de la temperatura

ra tiende a rebajar en ella la resistencia eléctrica, si bien dicho efecto sólo será notorio, en general, a temperaturas más elevadas que las que aquí se manejan.

Pero al desarrollarse el fraguado van creándose especies hidratadas que se separan de la disolución y van ordenándose en la fase sólida, disminuyendo el agua disponible en aquella y aumentando la rigidez total del sistema. Esto tiene como resultado una tendencia a umentar la resistencia eléctrica del conjunto, fenómeno que en el comienzo del fraguado corresponde a la brusca discontinuidad en la viscosidad de la pasta, citada por Brocard (3).

En el tramo A-M-B de la cruba R-t se refleja la acción contrapuesta de ambas tendencias. En el trozo A-M vence la segunda sobre la primera y la resistencia crece. En el máximo M ambas se igualan y en el trozo M-B vence la primera a la segunda.

El mínimo B de la curva R-t marca el final del fraguado y coincide con el máximo alcanzado en las curvas temperatura-tiempo (T-t) durante el proceso.

De B en adelante no existe ya más que la segunda tendencia y, en consecuencia, la resistencia crece definitivamente.

Fijándonos ahora en las curvas T_1 a T_6 correspondientes a temperaturas superiores a T_0 y crecientes en el orden natural de los subíndices, hay que señalar lo siguiente:

1º - Cuanto mayor es la temperatura mayor es la solubilidad de los componentes más solubles del cemento y mayor es por tanto, la velocidad de disolución de los mismos.

Tal sucede con los álcalis y el C_2S .

También será mayor la velocidad de reacción con el agua (hidrólisis) de los compuestos hidrolizables, Tal es el caso del C_3S y C_3A (3) (*).

En consecuencia, la disminución de resistencia eléctrica con el tiempo en el tramo A-O de las curvas R-t será tan to más pronunciada cuanto mayor sea la temperatura.

2º - Al mismo tiempo, si la solubilidad aumenta con la temperatura, cuanto mayor sea ésta, mayor será la cantidad de sustancia disuelta (concentración) en la fase disolución, ma yor por tanto, la conductividad y menor la resistencia eléctrica. Además, al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad de la solución, lo que a su vez contribuye a aumentar la conduc tividad y disminuir la resistencia eléctrica. Por todo ello las curvas R-t deberán situarse unas debajo de otras a medida que la temperatura va siendo mayor.

3º - En A comienza el fraguado y con él la elevación de temperatura por efecto del calor desprendido en el mismo, au mentando R entre A y M, por lo ya expuesto. Cuanto mayor sea la temperatura por encima del valor normal, tanto antes se alcanza rá el estado de equilibrio señalado por M, entre las dos ten dencias antes citadas, ya que la de la temperatura va siendo en tonces cada vez más importante frente a la otra. Además, si la fase sólida se comporta como un sólido semiconductor (3) (7) y el efecto de la disminución de R con el aumento de T se deja sen tir ya para los valores de T manejados, esto contribuye a incre-

(*) Lo contrario sucede con el C_4AF , por lo que ciertos cementos de fraguado rápido abundantes en tal componente, fraguan más des-
pacio al crecer la temperatura.

mentar la influencia de T tendiendo a rebajar R, sobre la tendencia de R a aumentar por efecto del propio fraguado. En consecuencia, a medida que T aumenta, el tramo A-M no sólo se acorta, sino que disminuye de pendiente.

4º - A fuerza de perder amplitud e inclinación el tramo A-M con la temperatura creciente, llega un momento en que, - para una T dada, desaparece por completo y los tramos O-A y B-C aparecen unidos.

5º - Al tramo B-C debe corresponderle tanta mayor pendiente cuanto mayor sea la temperatura, ya que, después del mínimo B que marca el final del fraguado, a mayor temperatura mayor será la velocidad de desecación y endurecimiento y, en consecuencia mayor el aumento de la resistencia eléctrica con el tiempo.

Todo lo expuesto en los cinco puntos que anteceden - puede verse perfectamente reflejado en el gráfico teórico de la figura 18, el cual a su vez está de acuerdo con los de las figuras 3 á 10, particularmente con el de la 3, del cual es un fiel reflejo.

Este hecho abona la explicación dada del fenómeno de la influencia de la temperatura en el fraguado, gracias a la técnica seguida para el estudio del mismo.

Las pequeñas discrepancias que en los gráficos experimentales pudieran apreciarse respecto del gráfico ideal teórico de la figura 18, se deben a que no siempre se tuvo en cuenta - la identidad en todos los casos, de las condiciones experimentales, pues, como se indicó en otro lugar, de las curvas R-t in-

teresa su forma y la posición de los puntos que marcan el principio y fin del fraguado y no el valor absoluto de la resistencia medida en cada caso, que puede depender de circunstancias tan ni mias como una mayor o menor separación de los electrodos para la medida, de una experiencia a otra. Así se explica el que, a veces, algunas curvas estén desplazadas de la posición que con respecto a las restantes les correspondería según el gráfico de la figura 18. No es, por consiguiente, error inherente al método, cuya reproducibilidad ponen bien de manifiesto los resultados expuestos en la figura 12.

La interpretación de los resultados obtenidos en cuanto a la influencia del porcentaje de agua de amasado en el tiempo de fraguado parece sencilla, en principio.

En efecto, cuanto mayor sea la cantidad de agua en la pasta, tal vez dentro de ciertos límites, mayor será la posibilidad de que inicialmente, durante el amasado, y aún después, se disuelva una mayor cantidad de sustancia.

Dada la lentitud con que cabe prever que transcurran los fenómenos de difusión en las condiciones reales de la pasta de cemento, a mayor porcentaje de agua mayor será el tiempo preciso para alcanzar el grado de saturación o sobresaturación de los componentes hidratados.

Así, pues, cuanto mayor sea el porcentaje de agua en la pasta, más se retrasará el fraguado.

Por otra parte, como la temperatura ejerce un efecto acelerante contrario, es lógico que el efecto retardador del aumento del porcentaje de agua en la pasta sea menos notorio cuan-

to mayor sea la temperatura, siendo posible obtener tiempos iguales de fraguado para temperaturas y porcentajes distintos con un mismo cemento, a condición de escoger convenientemente los valores que aquellos.

Una mayor cantidad de agua en la pasta hace que ésta sea más fluida, con lo que la resistencia de tipo óhmico debida a la interposición de un sólido, disperso en una disolución -mejor sería decir que la disolución está dispersa entre los poros de un sólido pulverulento o muy finamente granulado- disminuye y, en consecuencia, para un valor dado del tiempo, las curvas R-t presentan valores de R tanto menores cuanto mayor es el porcentaje de agua de amasado.

A la misma causa es atribuible el hecho de que las segundas ramas de las curvas R-t, después del segundo mínimo que señala el final del fraguado, sean tanto menos pendientes, cuanto mayor sea el porcentaje de agua de amasado.

4 - CONCLUSIONES

1ª - En el ensayo ordinario de la determinación del tiempo de fraguado (principio, fin e intervalo), de un cemento, no se tiene en cuenta, en general, la temperatura del agua de amasado ni la del ambiente que rodea a la pasta amasada, siendo así que variaciones del orden de 5°C pueden ocasionar variaciones del orden de dos horas y más en el final del fraguado.

2ª - El estudio de las variaciones del tiempo de fraguado y de la marcha del mismo con la temperatura es fácil con la nueva técnica en cualesquiera condiciones, a diferencia de lo

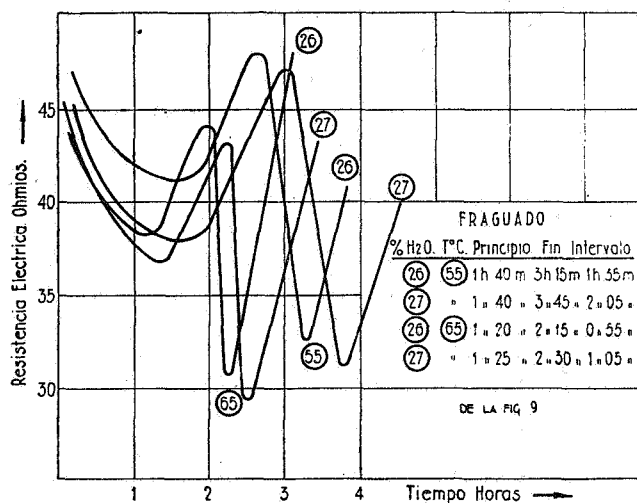


Fig. 13.

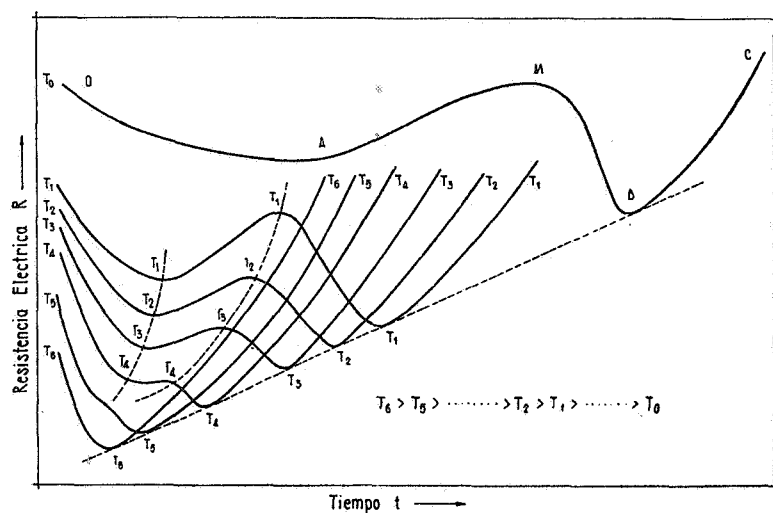


Fig. 18.

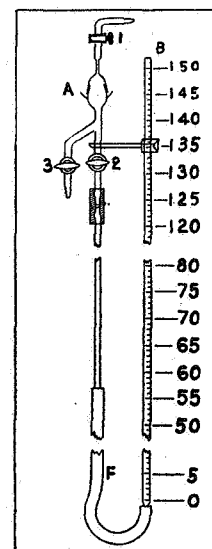


Fig. 19.

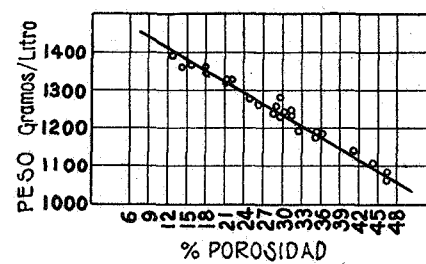


Fig. 20.

que sucede con las utilizadas hasta la fecha.

3ª - La aplicación de la citada técnica, en tal sentido, ha de ser de gran interés para el estudio de las condiciones óptimas de curado acelerado de morteros y hormigones a alta temperatura, importante desde el punto de vista de la prefabricación de piezas de hormigón y rebasando este interés el campo de lo teórico para entrar de lleno en el de las aplicaciones técnicas.

4ª - La explicación teórica que se da de la marcha de las curvas R-t a temperaturas superiores a las normales, a base de las que sirvieron de punto de partida al establecimiento de la técnica seguida para estudiarlas, aclara perfectamente todos los resultados experimentales obtenidos. Por otra parte, dicha explicación está de acuerdo con la dada por otros autores que han estudiado el problema siguiendo distinta técnica, y en condiciones experimentales diferentes (3).

5ª - Igualmente se da una explicación del hecho experimental confirmado de que al aumentar el porcentaje de agua en la pasta, se retrasa el fraguado, así como de la acción que dicho aumento ejerce en la forma y marcha general de las curvas R-t.

- - -

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