

ENSAYOS ACELERADOS DEL HORMIGON

Atilano LAMANA *

Drago ETEROVIC **

Alberto APARA **

RESUMEN

En este trabajo se propone un método para estimar, a un día, la resistencia del hormigón a los 28 días. Consiste en tratar térmicamente probetas cilíndricas de hormigón para obtener, mediante una aceleración de los procesos normales de hidratación, una alta resistencia en pocas horas, que está bien correlacionada con la que se logra después de 28 días de curado normal.

En estas experiencias se determinó el efecto de las variables tales como: tiempo de precurado, duración y temperaturas del tratamiento, tiempo de poscurado, etc. En forma complementaria se realizaron experiencias en morteros RILEM, con el propósito de extender el método propuesto al control rápido de cementos.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que es posible predecir la resistencia del hormigón a los 28 días, 29 horas después de haberlo confeccionado, con un error promedio máximo probable de aproximadamente un 13 %. En los morteros RILEM esta predicción puede hacerse con un error promedio máximo probable de aproximadamente un 5 %.

Finalmente se hace una breve comparación con investigaciones similares llevadas a cabo en el extranjero y se dan recomendaciones prácticas sobre el empleo del método aquí descrito.

*Ingeniero Investigador en IDIEM.

**Egresados Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile.

GENERALIDADES

La mayoría de los ensayos que reflejan cualidades resistentes del hormigón se hacen convencionalmente a una edad de 28 días. Sin embargo este período resulta demasiado largo en la práctica, ya que si se obtienen valores de resistencia anormales, cualquier enmienda implica una reacción muy retardada con respecto al avance de la faena.

La necesidad de una información más rápida ha llevado a considerar, como una primera estimación, la resistencia a la compresión a los 7 días, a partir de la cual se puede predecir la resistencia potencial a los 28 días. Al respecto existe un interesante estudio del ingeniero Moisés Piñeiro¹, del IDIEM, para la mayoría de los cementos chilenos.

Aun así, este período de 7 días resulta demasiado largo para que los resultados tengan un real interés práctico. Pero, por otra parte, según Malhotra², los ensayos realizados a menos de 7 días en probetas curadas en condiciones normales, no dan una buena indicación de la resistencia potencial del hormigón a los 28 días.

Por esto ha sido necesario recurrir a la medición de ciertas características del hormigón de poca edad, que estén bien correlacionadas con la resistencia a la compresión a los 28 días. Una de ellas, por ejemplo, es la medición de la razón agua-cemento en el hormigón recién confeccionado. Como se comprenderá, sin embargo, esta técnica infiere la resistencia a los 28 días considerando sólo uno de los factores que en ella influyen (razón A/C), escapando a un control de este tipo todas las demás fuentes de variación.

Frente a estos hechos, la mayoría de las investigaciones recientes, tendientes a un conocimiento pronto de la resistencia potencial del hormigón, tratan de obtener una rápida resistencia inicial, que esté bien correlacionada con la resistencia a los 28 días. Podemos esperar que esto se logrará en la medida en que esta rápida resistencia inicial se haya conseguido mediante una aceleración de los procesos normales de hidratación.

Actualmente el procedimiento más utilizado para alcanzar una alta resistencia inicial, consiste en someterlo a elevadas temperaturas durante las primeras horas después de confeccionado. Materialmente, un tratamiento en agua caliente o al vapor no difiere en forma significativa del que se podría lograr mediante el calor seco de un horno, siempre que se evite en cualquier caso la evaporación del agua del hormigón³.

En el actual estado en que se encuentran las investigaciones, se puede afirmar que de esa forma se logra una aceleración de los procesos normales de hidratación, y que existe una buena correlación entre la resistencia así lograda y la resistencia potencial a los 28 días.

El presente trabajo tiene por objeto establecer un método de control rápido de hormigones, mediante un tratamiento térmico. No existiendo en nuestro país antecedentes previos, el estudio tenía el propósito de abarcar todos los cementos fabricados en el país. Como un análisis particular para cada uno de los cementos

requeriría un gran número de ensayos, nos hemos limitado al estudio de dos cementos que, por sus características, son los más representativos en su clase; son ellos un cemento portland (Super Melón) y otro puzolánico (Polpaico Especial).

Hecha ya la elección del tipo de cemento, nos interesó obtener para cada uno de ellos, una amplia gama de resistencias, lo que sólo es posible variando la dosis de cemento empleado y la razón agua-cemento.

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis estadístico para apreciar así, cuantitativamente, los márgenes de error de las relaciones establecidas y poder valorar su aplicación en la práctica del control de hormigones.

Antecedentes

La necesidad de un control rápido del hormigón, no representa una inquietud reciente. Ya en el año 1933, D.G. Patch⁴ empleó un procedimiento de ensayo acelerado, por medio del cual obtenía una estimación de la calidad de los hormigones colocados en la represa de Hoover, después de 8 horas de haber sido confeccionados, y posteriormente son muchas las instituciones que de una u otra manera han ideado métodos similares para tener un antecedente rápido y adicional al ensayo normal a 28 días.

Muchos de esos trabajos se hicieron para controlar rápidamente obras en que el volumen de hormigón colocado diariamente hacía imposible una espera de 28 y aun de 7 días para obtener la información proporcionada por los métodos normales de curado.

En la Tabla I se presenta el enfoque que se ha dado en diferentes países, a este tipo de investigaciones.

TABLA I
CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE DIFERENTES PROCEDIMIENTOS
DE CURADO ACELERADO

Investigador	País	Tiempo curado normal	Tiempo curado acelerado	Temperatura	Tiempo poscurado
Cornwell ⁵	Australia	30 min	21 h 30 min	74°C	2 h
Akroyd ⁶ , modificado por Malhotra y Zoldners	Australia	24 h	3 h 30 min	100°C	1 h
Smith y Chojnacki ⁸	Canadá	variable	16 h	100°C	1 h
Jarocki ⁹	Polonia	12 h	1 h	de 16° a 90°C	
			5 h	90°C	6 h
R Dutron ¹⁰	Bélgica	2 h	3 h 20 min	de 20° a 60°C	
			9 h 40 min	60°C	9 h
Vuorinen	Finlandia	1 h	20 h	80° a 85°C	3 h
	Italia	16 h	8 h	80° a 85°C	---
Dubois ¹¹	Francia		4 h	80°C	

W.M. Malhotra² analizó 737 resultados obtenidos con el procedimiento de Cornwell⁵ en probetas confeccionadas con cemento portland II (designación ASTM) con distintas dosificaciones y llegó a la relación $R_{28} = 49.23 + 2 R_1$ (kg/cm^2).

Malhotra y Zoldners⁷ realizaron experiencias con cemento portland I (designación ASTM), por el procedimiento Akroyd⁶ modificado y propusieron una relación hiperbólica:

$$R_{28} = \frac{R_1}{11.1 \times 10^{-4} R_1 + 0.28} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

El método de Smith y Chojnacki⁸ se usó en Canadá para controlar 7600 m³ de hormigón de la cubierta de un puente, después de lo cual se estableció como control rutinario de calidad en 1964, extendiéndose a la inspección de hormigones de pavimentos a partir de 1965.

Con el método de R. Dutron¹⁰ se ensayaron 23 muestras de cementos, portland y de alto horno, procedentes de diferentes fábricas belgas, que comprendían las tres clases normalizadas en ese país: normal, alta resistencia y de endurecimiento rápido. Resumiendo la totalidad de los resultados en una regresión común, se obtuvo la expresión: $R_{28} = 3.23 R_1^{0.885}$ (kg/cm^2).

J. Vuorinen realizó un estudio estadístico con datos provenientes de diversas obras en las cuales se aplicó su método y propuso el empleo de una fórmula exponencial del tipo $R_{28} = a R_1^{0.8}$.

Reacciones de hidratación

Cuando se mezcla agua con cemento las reacciones químicas que se producen originan un cambio en la estructura de la pasta, por lo que la masa plástica se hace rígida y resistente.

Si se eleva la temperatura a que se realiza la hidratación, tanto Reinsdorf¹² como Mironov¹³ señalan que las reacciones químicas de la pasta de cemento se aceleran, y el contenido de geles a edad temprana aumenta, lo que en regla general, conduce a un aumento de la resistencia del cemento.

Nurse³ indica que las reacciones de hidratación no varían, pero que la velocidad de éstas en todos los minerales del clínquer, aumenta con la temperatura; señala, asimismo, que si se agregan materias puzolánicas, su reacción con el hidróxido de calcio intensifica los efectos provocados por la temperatura.

Se ha podido constatar, sin embargo, que la hidratación del cemento a una edad avanzada, es aminorada cuando rigen temperaturas elevadas durante el primer período de reacción¹⁴. La razón puede explicarse, según Reinsdorf, por el hecho de que, a altas temperaturas, los productos de rápida hidratación recubren las partículas de cemento, que aún no han reaccionado, con una película de silicatos muy rígida, impidiendo la posterior hidratación. Los productos que se hidratan rápidamente a altas temperaturas envuelven las partículas de cemento, impidiendo la formación de una estructura análoga a la que se formaría mediante una hidratación a temperaturas normales.

Verbeck¹⁵ concuerda con las hipótesis señaladas, agregando que los productos de hidratación quedan concentrados junto a los granos de cemento, pero sin alcanzar la uniformidad que se lograría mediante un curado normal, lo que provoca una disminución de la resistencia para un grado de hidratación determinada.

EXPERIENCIAS

Para cumplir el objeto que se perseguía, es decir, establecer un proceso de aceleración de la resistencia del hormigón preparado con cementos chilenos que diera a corto plazo una buena estimación de la resistencia a 28 días, se desarrolló un programa experimental cuyos detalles se exponen a continuación haciendo una descripción de los materiales usados, de la dosificación y preparación del hormigón y del procedimiento de curado acelerado.

Materiales

A continuación daremos a conocer las características y propiedades de los materiales utilizados en la experiencia.

Agregado grueso

Se utilizó chancado procedente de los pozos de la Sociedad Minera Arrip que fue tamizado por mallas ASTM de 1 1/2", 3/4", 3/8" y N° 4, almacenando las cantidades en ellas retenidas en silos separados. Se eligió entonces una curva granulométrica dentro de la banda ASTM¹⁶, que se reprodujo en cada dosificación. La granulometría adoptada y las características físicas del agregado grueso se presentan en la Tabla II.

TABLA II
CARACTERISTICAS DEL ARIDO GRUESO

Abertura Tamiz	% en peso que pasa	Recomendación ASTM, (%)
1 1/2"	100	95 - 100
3/4"	40	35 - 70
3/8"	10	10 - 30
N° 4 ASTM	0	0 - 5
Densidad aparente, suelta	1.47 kg/dm ³	
Densidad aparente, asentada	1.56 "	
Densidad aparente, compacta	1.67 "	
Peso específico seco	2.67	
Peso específico saturado seco	2.70	
Porcentaje de absorción	0.85	

Agregado fino

La arena empleada fue de ARRIP tamizada por la malla N° 4 ASTM. La granulometría usada y las características físicas de la arena se anotan en la Tabla III.

TABLA III
CARACTERISTICAS DEL ARIDO FINO

Abertura ASTM Tamiz N°	% en peso que pasa	Recomendación ASTM, %
4	100	95 - 100
8	86	80 - 100
16	74	50 - 85
30	51	25 - 60
50	17	10 - 30
100	5	2 - 10
Módulo de finura		2.67
Densidad aparente suelta		1.60 kg/dm ³
Densidad aparente asentada		1.77 "
Densidad aparente apisonada		1.84 "
Peso específico seco		2.57
Peso específico saturado seco		2.64
Porcentaje de absorción		2.86

Cemento Super Melón

Es tipo portland y cumple con la norma INDITECNOR 30-27 ch¹⁷. Su tiempo de fraguado inicial es de 3 h y el final de 5 h 50 min. Su resistencia a la compresión en mortero RILEM es de 299 kg/cm² a 3 días, 352 kg/cm² a 7 días y 424 kg/cm² a 28 días. Su superficie específica Blaine es de 3300 cm²/g.

La composición química de este cemento es:

SiO ₂	19.1 %
FeO ₂	3.1 %
Al ₂ O ₃	6.5 %
CaO	64.4 %
MgO	1.9 %
SO ₃	3.4 %
Pérdidas por calcínación	1.5 %
Residuo insoluble	1.6 %

A esta composición corresponde la siguiente proporción de componentes fundamentales, calculada por la fórmula de Bogue:

C3S-59.6 % ; C2S-9.8 % ; C3A-11.8 % y C4AF-9.5 %

Cemento Polpaico Especial

Es tipo portland puzolánico según la norma INDITECNOR 30-93 ch¹⁸. Tiene fraguado inicial a 5 h 10 min y final a 8 h 10 min. Su resistencia a la compresión en mortero RILEM es de 171 kg/cm² a 3 días, 234 kg/cm² a 7 días y 331 kg/cm² a 28 días. Tiene superficie específica Blaine de 4100 cm²/g. Su contenido de puzolana es de 30 % en peso.

Dosificación de los hormigones

Esta se hizo de acuerdo a instrucciones para dosificar hormigones de modo rápido, basadas en el método ACI 613-54¹⁹, y adaptadas a las condiciones de los áridos y cementos chilenos. Para la corrección de la grava en hormigones con descenso de cono inferior a 8 cm, se redujeron los coeficientes recomendados en un 50 %.

Programación de las experiencias

Con el objeto de estudiar la influencia de la dosis de cemento, se consideraron 3 dosis diferentes: 200, 300 y 400 kg de cemento por m³, elegidas de modo de tener un rango de razones A/C de bastante amplitud, que permitiera obtener con mayor precisión una regresión estadística. Para cada dosis de cemento se eligió un rango de variación de la razón A/C entre 0.35 y 1.00, con intervalos de 0.05, y con la limitación que la cantidad de agua no fuese inferior a 120 litros por m³ ni superior a 200 l/m³. Por cada dosificación resultante se confeccionaron dos coladas idénticas.

Se confeccionaron así, 38 colocadas para cada tipo de cemento, que se distribuyeron en 8 de 400 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, 12 de 300 kg y 18 de 200 kg.

Cada colada fue de 37 l, con los cuales se llenaron 6 cilindros de 15 x 30 cm, destinándose 3 probetas a ensayo acelerado y 3 a ensayo a 28 días con curado normal.

El orden de confección de las coladas se determinó mediante un muestreo al azar deducido de la norma INDITECNOR 5-3²⁰ *Selección de muestras al azar*.

Confección del hormigón

Este fue preparado en una betonera de eje vertical de 50 l de capacidad. El tiempo de revoltura se fijó en 2 minutos 30 segundos. Posteriormente se realizaba una revoltura manual y se determinaba la consistencia mediante el cono de Abrams. Hecho esto se procedía a llenar y compactar los moldes según ASTM. Para consistencia seca se compactaron las probetas por vibrado en una mesa vibratoria, sobre la cual se colocaban los 3 moldes compañeros. El tiempo de vibrado dependía de la consistencia del hormigón, variando entre 5 segundos y 1 minuto.

Después de compactados, los 6 cilindros provenientes de una misma colada eran llevados a una cámara húmeda adyacente, cuya temperatura era de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y la humedad relativa de $95 \pm 5\%$.

Equipo empleado

Equipo para el curado en agua caliente. Se construyó para este fin un estanque

metálico de 160 cm de largo, 60 cm de alto y 60 cm de ancho, que se llenaba hasta una altura aproximada de 45 cm. Estas dimensiones daban un espacio suficiente para tratar térmicamente 9 probetas en forma simultánea, aunque se tuvo la precaución de no colocar más de 3 al mismo tiempo. Si consideramos la capacidad calórica del hormigón como $c = 0.27$ kcal/kg y un peso específico promedio de 2.4, la absorción de calor de las tres probetas cilíndricas de 15 x 30 cm resulta igual a 860 kcal aproximadamente, valor despreciable frente a la masa calórica que posee el agua del estanque en ebullición.

El sistema de calefacción lo constituyó un grupo de 6 calefactores de inmersión que suministraba una potencia fija calefactora de 3.7 kW y una potencia adicional discretamente variable entre los límites 0 y 30.0 kW.

Para evitar un gradiente de temperatura en el agua del estanque, se dispuso un agitador interior, accionado manualmente desde el exterior.

Los cilindros eran colocados verticalmente sobre una delgada rejilla de madera, que permitía darles un tratamiento uniforme.

Algunos detalles de este equipo se muestran en Fig. 1.

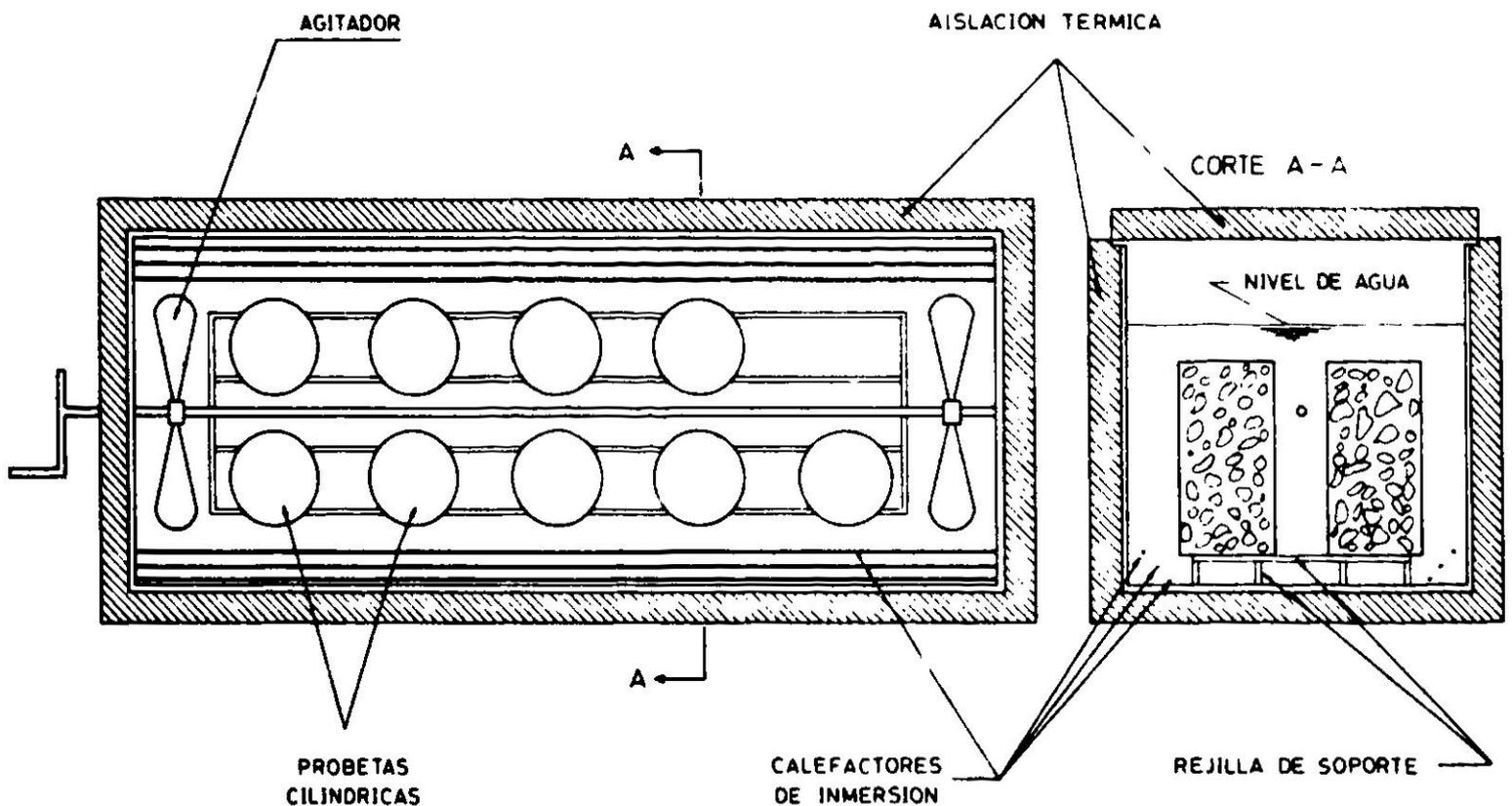


Fig. 1. Esquema del equipo empleado para el curado acelerado.

Equipo de ensayo a compresión. Para determinar la carga de ruptura de las probetas, empleamos una máquina Losenhausenwerk Maschinenband AG., con una capacidad máxima de carga de 300 t, que se usó en las escalas de 60 t y 150 t, y con una velocidad de deformación de 10 mm/min.

Método de ensayo normal

Después de mantener 24 horas las probetas en la cámara húmeda ya descrita, eran desmoldadas y trasladadas a otra cámara de mayor capacidad de igual temperatura y humedad. Esto permitió almacenar la totalidad de las probetas que some-

timos a este ensayo a condiciones de temperatura y humedad constantes. Se mantuvieron allí durante los siguientes 27 días. Dos horas antes de ensayarlas se retiraban de la cámara húmeda y se procedía a pesarlas, medirlas y rectificarles las caras basales con una mezcla de azufre, arcilla y grafito, ensayándolas a compresión posteriormente.

Para todas las probetas, el diámetro se midió en dos direcciones perpendiculares y se tomó el promedio de ambas medidas.

Elección del método de ensayo acelerado

Como no había antecedentes sobre el comportamiento de los cementos chilenos sometidos a un tratamiento térmico, fue necesario realizar como primera fase de las experiencias un estudio de las distintas variables que lo definen.

En muchos aspectos se tomó en consideración las recomendaciones dadas por investigadores extranjeros, y además se procuró simplificar el equipo requerido y adaptar el ciclo de tratamiento a los horarios normales de trabajo.

Tiene interés hacer constar las razones que nos llevaron a elegir cada una de las etapas del ciclo de tratamiento térmico.

Curado en agua. Tal como hemos comentado anteriormente, no existe una diferencia fundamental entre emplear un tratamiento al calor seco, en vapor o en agua caliente. El primer procedimiento, sin embargo, requiere disponer de moldes herméticos que eviten la disminución del agua de amasado y de un horno de alta capacidad calórica, que permita introducir probetas en él sin disminución apreciable de la temperatura.

Respecto a los otros dos procedimientos, ambos permiten tratar el hormigón sin el peligro de la eliminación de agua. Hemos elegido entre las dos alternativas el tratamiento en agua caliente, por la simplicidad del equipo requerido, unido a la gran capacidad calórica de este medio.

Temperatura de curado. Adoptado ya el medio de calentamiento, debemos elegir la temperatura adecuada. En primer lugar, basándonos en el concepto de "maduración", que permite expresar la resistencia del hormigón como una función creciente del producto tiempo por temperatura, concluimos que era preferible elegir una temperatura elevada, que diera como resultado una alta resistencia en pocas horas.

La temperatura de ebullición del agua, además de cumplir con lo anterior, es automantenida, eliminando la necesidad de disponer de termostatos, y lográndose por lo tanto una considerable simplificación del equipo. Por otro lado, las variaciones de temperatura en este medio, naturalmente controlado, son mucho menores que las producidas en baños controlados por elementos termoeléctricos simples.

Elección del tiempo de precurado. Respecto al tiempo de precurado se puede concluir, basándose en la opinión de autores tales como Hanson¹⁵, Saul¹⁵ y Shidler¹⁵, que a medida que se aumenta la temperatura del tratamiento térmico,

es necesario aumentar la duración del tiempo de precurado para obtener resultados aceptables.

Por otra parte, Mironov¹³ ha demostrado que la dilatación de la masa de hormigón es una función decreciente del tiempo de precurado, y que ésta se hace asintótica a un valor mínimo, aproximadamente después de 24 horas. Según el mismo Mironov, es necesario eliminar estas dilataciones, que provocarían microfisuras perjudiciales en la resistencia.

Finalmente, la necesidad de adaptar el ciclo del tratamiento a jornadas normales de trabajo, nos llevó a la elección de 24 horas como el período más adecuado de precurado.

Tiempo de curado en agua hirviente. Para elegir adecuadamente este parámetro, se hicieron algunas experiencias preliminares, estudiándose en ellas la influencia del tiempo de hervido sobre la resistencia alcanzada. Los resultados obtenidos, para una dosificación particular, y para ambos tipos de cemento empleados, se muestran en Fig. 2.

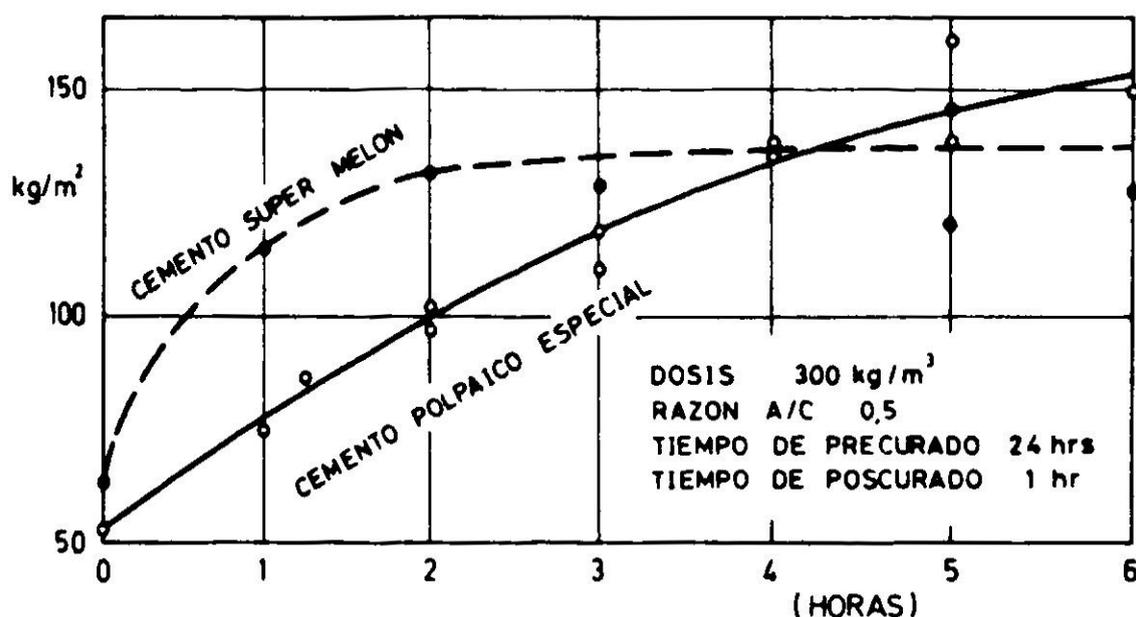


Fig. 2. Relación entre las resistencias y el tiempo de hervido, en hormigones.

Si observamos la curva del cemento Super Melón, podemos apreciar que transcurridas 2 horas de tratamiento térmico, ya no se logran mayores aumentos de resistencia. En el cemento Polpaico Especial, en cambio, una prolongación del tratamiento en agua hirviente produce un aumento de la resistencia, aunque los porcentajes de aumento son cada vez menores, a medida que se prolonga el tiempo de hervido. Los incrementos de resistencias logradas con un tratamiento de más de 4 horas de duración, resultan de un elevado costo marginal.

Ya que se trata de elegir un procedimiento común para ambos tipos de cemento, la duración del tiempo de hervido se fijó en 4 horas.

Tiempo de poscurado. Entenderemos como tal aquel lapso que transcurre entre el retiro de las probetas del agua hirviente y el momento del ensayo.

Se eligió una hora para este tiempo; en primer lugar, porque el rectificando de las caras es necesario hacerlo aproximadamente 3/4 de hora después del retiro de las probetas del agua hirviente para obtener un refrentado sin porosidades; y en

segundo lugar, porque queda un intervalo de tiempo suficiente para corregir cualquier defecto del refrentado sin alterar la duración total del ciclo.

Ciclo de tratamiento térmico

El ciclo de tratamiento elegido finalmente, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, fue el que se describe a continuación.

Después de mantener 24 horas las probetas en la cámara húmeda, tres eran desmoldadas y colocadas verticalmente en el estanque que contenía el agua en ebullición. Allí se mantenían durante las 4 horas siguientes; transcurrido este período eran retiradas del estanque y se dejaban enfriar en el ambiente del laboratorio durante media hora. En la siguiente media hora se pesaban, medían y rectificaban. Una hora después de retiradas del estanque eran ensayadas a compresión. El detalle de esta secuencia se muestra en Fig. 3.

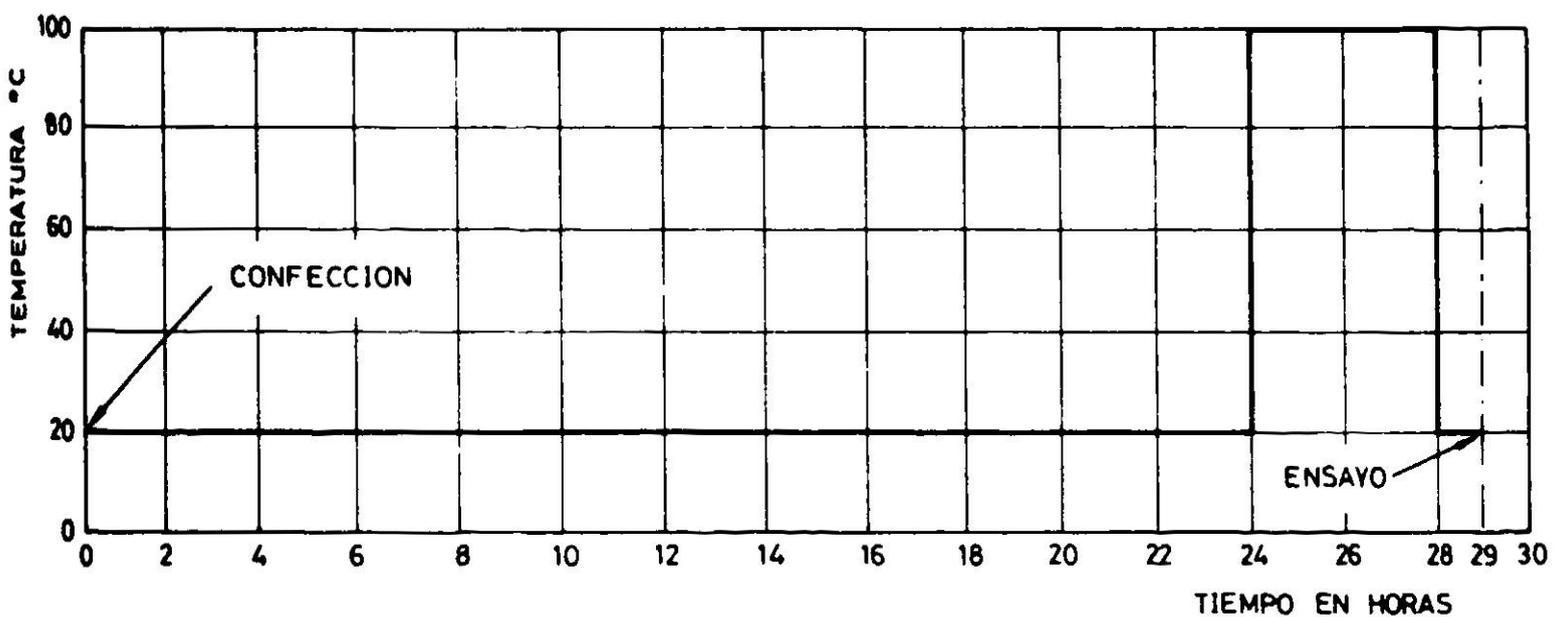


Fig. 3. Esquema del ciclo de curado acelerado.

APLICACION DEL METODO A MORTEROS

Generalidades

Antes de utilizar el método de curado acelerado en hormigones, se llevaron a cabo una serie de experiencias preliminares sobre morteros, para formarnos una idea sobre la factibilidad de tal procedimiento. Como el propósito del estudio es determinar si existe una aceleración en las reacciones de hidratación del cemento, es útil el empleo de morteros cuya confección, curado y ensayo están ceñidos a normas rigurosas que eliminan la influencia de parámetros adicionales.

Los morteros se confeccionaron estrictamente de acuerdo al método RILEM que es de uso rutinario en IDIEM.

Los cementos empleados fueron los mismos que para el caso de hormigones.

El equipo utilizado para el curado en agua caliente, consistía en un recipiente metálico de aproximadamente 50 l de capacidad; su temperatura se elevaba mediante dos mecheros a gas. En este recipiente se colocaban 6 probetas suficientemente alejadas del fondo para asegurarnos que quedaban sometidas a una

temperatura uniforme.

Para el ensayo de compresión se utilizó una máquina Alfred J. Amsler & Co con una capacidad de carga máxima de 60 t y velocidad de carga regulable.

La elección del método se basó en las consideraciones ya indicadas al tratar de los hormigones; dada la forma de las curvas de aumento de resistencia con el tiempo de hervido, Fig. 4, se consideró suficiente fijar éste en 3 horas 30 minutos. (Después, al estudiar los hormigones, se prefirió para ellos un tiempo de ebullición de 4 horas, como ya se ha indicado).

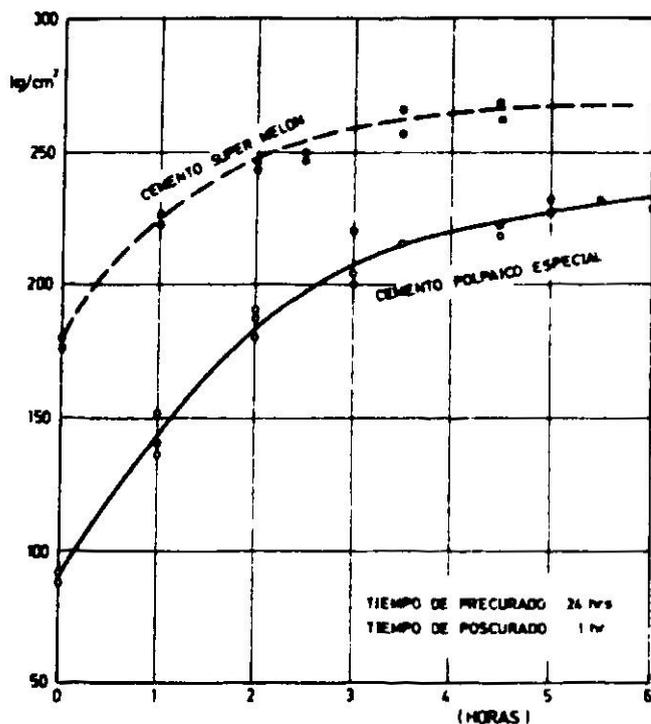


Fig. 4. Relación entre las resistencias y el tiempo de hervido, en morteros RILEM.

Un resumen del método empleado en morteros es el siguiente: las probetas recién confeccionadas se mantenían durante 24 horas en cámara húmeda, a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y 95% de humedad relativa. Transcurrido este plazo se desmoldaban y se colocaban de inmediato en el estanque que contenía el agua en ebullición. Se mantenían en estas condiciones durante 3 horas y 30 minutos, después de las cuales se retiraban, dejándolas una hora en ambiente de laboratorio para permitir que se enfriaran.

El ensayo de compresión se efectuaba inmediatamente después, permitiendo conocer los valores de resistencia a las 28 horas 30 minutos de haberse confeccionado el mortero.

La programación de las experiencias se realizó con el propósito de determinar la dispersión del método y la precisión en la predicción de la resistencia a los 28 días. Para cada tipo de cemento se tomó una muestra suficientemente grande, que se almacenó en envases herméticos durante el desarrollo de estas experiencias; de este modo, las diferencias entre los resultados reflejarán las imperfecciones de los métodos de confección, curado y ensayo, independizándolas de las alteraciones en la calidad de los componentes.

Se prepararon, para cada tipo de cemento, 6 series de 4 moldes cada una. Cada molde estaba formado por 3 probetas RILEM. De ellos, un molde se destinó a ensayo acelerado y uno para cada uno de los ensayos a 3, 7 y 28 días con curado normal.

TABLA IV
 RESULTADOS EN MORTEROS DE CEMENTO SUPER MELON
 RESISTENCIAS A COMPRESION, kg/cm²

Serie Nº	Ensayo Acelerado 1 día		Ensayo Normal					
			3 días		7 días		28 días	
	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}
1	266	266	291	302	353	353	418	407
	268		300		338		394	
	269		306		356		406	
	275		300		344		400	
	254		306		362		414	
	266		309		366		411	
2	252	257	291	292	334	347	422	407
	244		296		319		379	
	254		288		356		400	
	258		294		362		386	
	266		291		359		409	
	266		292		353		408	
3	278	278	300	294	359	351	436	442
	281		297		353		445	
	269		305		344		456	
	284		308		362		434	
	281		284		356		438	
	277		281		334		445	
4	272	274	309	301	328	350	434	432
	250		305		347		434	
	288		291		338		429	
	275		306		356		441	
	280		294		369		419	
	277		296		262		433	
5	271	270	281	294	361	350	416	420
	268		288		364		425	
	274		307		346		425	
	278		300		340		431	
	275		296		342		419	
	255		292		344		406	
6	279	276	301	312	358	358	437	436
	271		309		343		439	
	278		317		360		433	
	285		310		350		445	
	280		315		367		424	
	264		318		371		436	

TABLA V
 RESULTADOS EN MORTEROS DE CEMENTO POLPAICO ESPECIAL
 RESISTENCIAS A COMPRESION, kg/cm²

Serie N°	Ensayo Acelerado 1 día		Ensayo Normal					
			3 días		7 días		28 días	
	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}	R _i	\bar{R}
1	201	212	181	186	216	233	339	346
	203		188		234		350	
	216		188		222		356	
	220		188		231		355	
	212		179		251		341	
	222		189		246		333	
2	207	211	178	179	221	222	314	326
	204		177		214		334	
	212		191		227		322	
	223		178		215		326	
	202		171		230		322	
	220		181		225		336	
3	194	193	172	168	239	234	312	330
	191		169		242		331	
	191		165		241		331	
	194		171		232		334	
	194		168		229		334	
	192		161		222		338	
4	197	195	156	158	235	241	331	321
	194		164		258		322	
	200		162		239		334	
	203		138		242		316	
	188		160		234		312	
	191		166		238		312	
5	189	190	196	191	250	248	344	343
	189		197		250		352	
	184		194		249		346	
	191		194		253		369	
	195		179		241		328	
	—		184		244		326	
6	200	199	168	174	223	223	330	322
	199		165		214		325	
	198		161		226		335	
	205		167		217		317	
	201		164		231		312	
	193		157		226		314	

Resultados

Los resultados se presentan en las Tablas IV y V.

Dispersión dentro del ensayo

La expresaremos por el coeficiente de variación de las resistencias correspondientes a las probetas compañeras de un mismo molde.

Para el cemento Super Melón se obtuvo un coeficiente de variación de 3.46% en ensayo acelerado como promedio de las seis series, (6 moldes), y de 2.99% en ensayos normales como promedio de las seis series y de las tres fechas, (18 moldes).

Para el cemento Polpaico los valores fueron respectivamente, 2.80% y 3.41%.

El término medio conjunto es de 3.13% para ensayo acelerado y 3.20 para ensayos normales.

Dispersión entre ensayos

La calculamos como el coeficiente de variación entre medias de resistencias a la misma edad de diferentes series. Como ya hemos dicho, cada serie estuvo hecha en distinta fecha, pero con el mismo método, materiales y equipo.

Los resultados fueron de 3.76% como término medio para ambos cementos del coeficiente de variación de las medias en ensayo acelerado y 3.73% para ensayo normal, término medio para ambos cementos y las tres fechas.

Predicción de la resistencia a los 28 días

En la Tabla VI se dan los resultados de la razón k entre la resistencia a 28 días y la correspondiente a un día, obtenidas ambas de moldes confeccionados simultáneamente.

TABLA VI
VALORES DE LA RAZON R_{28}/R_1 PARA AMBOS CEMENTOS

Serie Nº	Cemento Super Melón	Cemento Polpaico Especial
1	1.530	1.631
2	1.588	1.542
3	1.588	1.710
4	1.579	1.646
5	1.557	1.801
6	1.582	1.619
Promedios	1.571	1.657
Desviación	0.0232	0.1036
Coef. Var.	1.47	6.25

De esta forma resultan los límites de confianza 95 % que se indican a continuación:

Cemento Super Melón : $k = 1.571 \pm 0.024$

Cemento Polpaico Especial : $k = 1.657 \pm 0.108$

Es necesario destacar que los valores de k fueron determinados en probetas confeccionadas con una misma muestra de cemento; por lo tanto, el error calculado debe aumentar si el coeficiente k se establece con datos obtenidos de ensayos realizados sobre muestras diferentes de un mismo tipo de cemento. Por otra parte, si consideramos que el valor de R_{28} calculado, corresponde a una estimación de la resistencia a los 28 días del molde compañero de aquél empleado en la determinación de R_1 , y no a la resistencia real del mortero a los 28 días, los errores anteriormente señalados deben disminuirse, ya que éstos llevan incluidos el error del ensayo a los 28 días.

Aun considerando las observaciones anteriores, podríamos decir que los errores relativos obtenidos justificarían el empleo del procedimiento de curado acelerado propuesto, para tener una temprana información sobre la resistencia a los 28 días del mortero.

APLICACION DEL METODO A HORMIGONES

Resultados

Los resultados de los ensayos realizados con hormigón se dan en las Tablas VII y VIII. En ellas se entregan los datos correspondientes al cemento Super Melón y el cemento Polpaico Especial respectivamente. Se indican la dosis de cemento y la razón agua-cemento usadas para cada una de las 36 coladas y se presentan las resistencias medias de cada colada y los coeficientes de variación entre sus probetas compañeras, tanto con curado normal como con curado acelerado.

Los coeficientes de variación promedios son, para el cemento Super Melón de 3.82 % en ensayo acelerado y 4.25 % en ensayo normal, y para el cemento Polpaico de 4.50 % y 3.50 %, respectivamente. Los términos medios ponderados de ambos cementos son, 4.17 % para ensayo acelerado y 3.85 % para ensayo normal.

A partir de los valores de resistencia obtenidos, se buscaron líneas de regresión entre la resistencia a 28 días con curado normal y la resistencia a 29 horas con curado acelerado. Para encontrar una función adecuada, se utilizó la relación de Abrams entre cada una de esas resistencias y la razón agua/cemento.

Interpretación

Cemento Super Melón

Relación entre la resistencia a 28 días y la razón agua-cemento. Ajustamos la expresión de Abrams, que es de la forma $R = M/N^{A/C}$.

TABLA VII

RESULTADOS DE HORMIGONES CON CEMENTO SUPER MELON
RESISTENCIAS EN kg/cm^2 . COEFICIENTES DE VARIACION, C_v , EN %

Razón A/C	Dosis kg/m^3	Curado acelerado		Curado normal	
		Resistencia	C_v	Resistencia	C_v
0.35	400	282.4	3.73	375.2	3.60
0.35	400	264.9	2.19	362.7	5.13
0.40	400	214.9	6.01	348.3	2.07
0.40	400	232.8	1.76	356.0	0.73
0.40	300	248.1	2.34	350.2	8.91
0.40	300	270.0	5.80	369.7	8.52
0.45	400	199.0	2.46	320.0	2.86
0.45	400	185.8	2.57	321.3	2.05
0.45	300	192.7	2.97	316.4	0.78
0.45	300	215.3	1.19	335.0	2.12
0.50	400	127.4	2.56	230.2	3.15
0.50	400	148.7	1.32	278.7	11.50
0.50	300	155.4	3.87	261.4	9.24
0.50	300	165.0	1.88	286.8	4.46
0.55	300	122.9	2.52	257.3	1.44
0.55	300	136.1	3.08	263.8	2.62
0.60	300	95.8	5.35	229.2	5.56
0.60	300	111.5	2.02	220.8	6.65
0.65	300	84.4	5.10	213.5	7.95
0.65	300	71.0	6.75	169.9	2.21
0.65	200	94.2	7.78	221.4	1.32
0.65	200	99.6	2.49	221.3	3.07
0.70	200	81.6	1.90	190.1	9.45
0.70	200	81.6	10.46	201.4	3.16
0.75	200	89.4	0.67	182.8	5.06
0.75	200	78.6	2.95	180.4	6.21
0.80	200	58.8	2.06	146.6	0.19
0.80	200	57.2	3.53	136.7	1.11
0.85	200	51.5	4.94	137.8	1.49
0.85	200	52.1	14.35	139.2	1.85
0.90	200	48.5	4.02	125.4	4.49
0.90	200	46.5	4.41	132.0	4.97
0.95	200	35.3	0.00	93.5	5.78
0.95	200	32.0	3.38	95.2	6.53
1.00	200	28.3	2.15	80.7	2.16
1.00	200	32.9	7.04	93.2	1.71

TABLA VIII

RESULTADOS DE HORMIGONES CON CEMENTO POLPAICO ESPECIAL
RESISTENCIAS EN kg/cm^2 . COEFICIENTES DE VARIACION, C_v , EN %.

Razón A/C	Dosis kg/cm^3	Curado acelerado		Curado normal	
		Resistencia	C_v	Resistencia	C_v
0.35	400	179.4	7.34	340.8	4.63
0.35	400	208.3	5.30	356.5	3.17
0.40	400	206.1	4.56	298.0	1.20
0.40	400	203.0	1.82	294.9	3.14
0.40	300	257.0	3.93	330.8	1.93
0.40	300	215.1	7.42	312.1	6.28
0.40	300	172.6	1.14	310.0	2.64
0.45	400	159.7	4.00	269.5	3.20
0.45	400	166.7	10.49	277.0	2.63
0.45	300	192.9	3.07	290.8	4.47
0.45	300	195.7	2.20	287.0	0.25
0.50	400	132.3	10.70	214.0	4.16
0.50	400	123.5	9.76	226.5	2.72
0.50	300	140.0	5.79	260.3	3.82
0.50	300	156.2	0.96	250.1	2.57
0.55	300	100.4	8.56	223.7	1.13
0.55	300	115.8	7.50	203.4	2.82
0.60	300	84.1	5.87	147.8	7.81
0.60	300	66.2	4.92	154.4	2.00
0.60	200	99.7	10.10	192.5	1.41
0.60	200	114.5	1.11	210.2	7.87
0.65	300	70.2	5.62	126.1	2.43
0.65	300	76.6	3.50	142.5	3.60
0.65	200	94.7	1.33	169.4	1.71
0.65	200	90.2	2.66	173.1	5.78
0.70	200	70.3	9.46	140.0	2.84
0.70	200	65.1	2.08	120.5	4.43
0.75	200	55.6	5.50	106.0	2.08
0.75	200	49.6	1.17	85.1	6.81
0.75	200	70.1	2.01	122.3	7.21
0.80	200	56.6	3.35	100.9	3.24
0.80	200	57.8	4.35	102.8	4.67
0.85	200	40.0	1.38	69.4	1.27
0.85	200	38.6	2.60	62.5	0.51
0.90	200	38.8	2.09	71.8	2.03
0.90	200	38.4	6.77	73.0	3.37
0.95	200	28.0	1.96	51.0	6.86
0.95	200	28.1	3.74	56.6	0.57
1.00	200	23.2	1.29	40.0	5.75
1.00	200	24.1	2.65	44.3	4.90

Para las 36 coladas analizadas, la expresión obtenida y los límites de confianza entre los cuales existe un 90 % de probabilidad de encontrar el valor R_{28} que corresponde a una razón A/C dada, son:

$$\text{línea de regresión} \quad R_{28} = \frac{810.13}{8.19^{A/C}}$$

$$\text{límite superior} \quad R_{28} = \frac{892.40}{8.19^{A/C}}$$

$$\text{límite inferior} \quad R_{28} = \frac{735.47}{8.19^{A/C}}$$

Estas expresiones están representadas por las curvas de la Fig. 5, donde, además, aparecen los valores individuales correspondientes a cada una de las 36 coladas.

Relación entre la resistencia acelerada, R_1 , y la razón agua-cemento. También para el caso de resistencias aceleradas parece justificado hacer uso de la relación funcional de Abrams entre resistencias y razón agua-cemento para calcular la línea de regresión y los límites de confianza para 90 %. Haciéndolo se obtuvieron las expresiones que siguen a partir de las 36 coladas:

$$\text{línea de regresión} \quad R_1 = \frac{874.02}{29.60^{A/C}}$$

$$\text{límite superior} \quad R_1 = \frac{1018.67}{29.60^{A/C}}$$

$$\text{límite inferior} \quad R_1 = \frac{749.90}{29.60^{A/C}}$$

En la Fig. 6 se representan las curvas correspondientes a estas expresiones y en ellas también se han colocado los valores individuales correspondientes a cada colada.

Relación entre la resistencia acelerada y la resistencia normal. Habiendo aceptado que tanto la resistencia acelerada, R_1 , como la resistencia normal R_{28} cumplen la relación de Abrams, es posible deducir analíticamente la función que liga estas dos variables¹, que es del tipo $R_{28} = K \cdot R_1^m$

Reemplazando los valores numéricos obtenidos en los párrafos anteriores, la expresión queda:

$$R_{28} = 12.09 R_1^{0.621}$$

Este resultado no nos proporciona ningún índice sobre la bondad del ajuste. Se procedió, por lo tanto, a calcular la línea de regresión, directamente entre los valores de resistencia obtenidos en los dos ensayos.

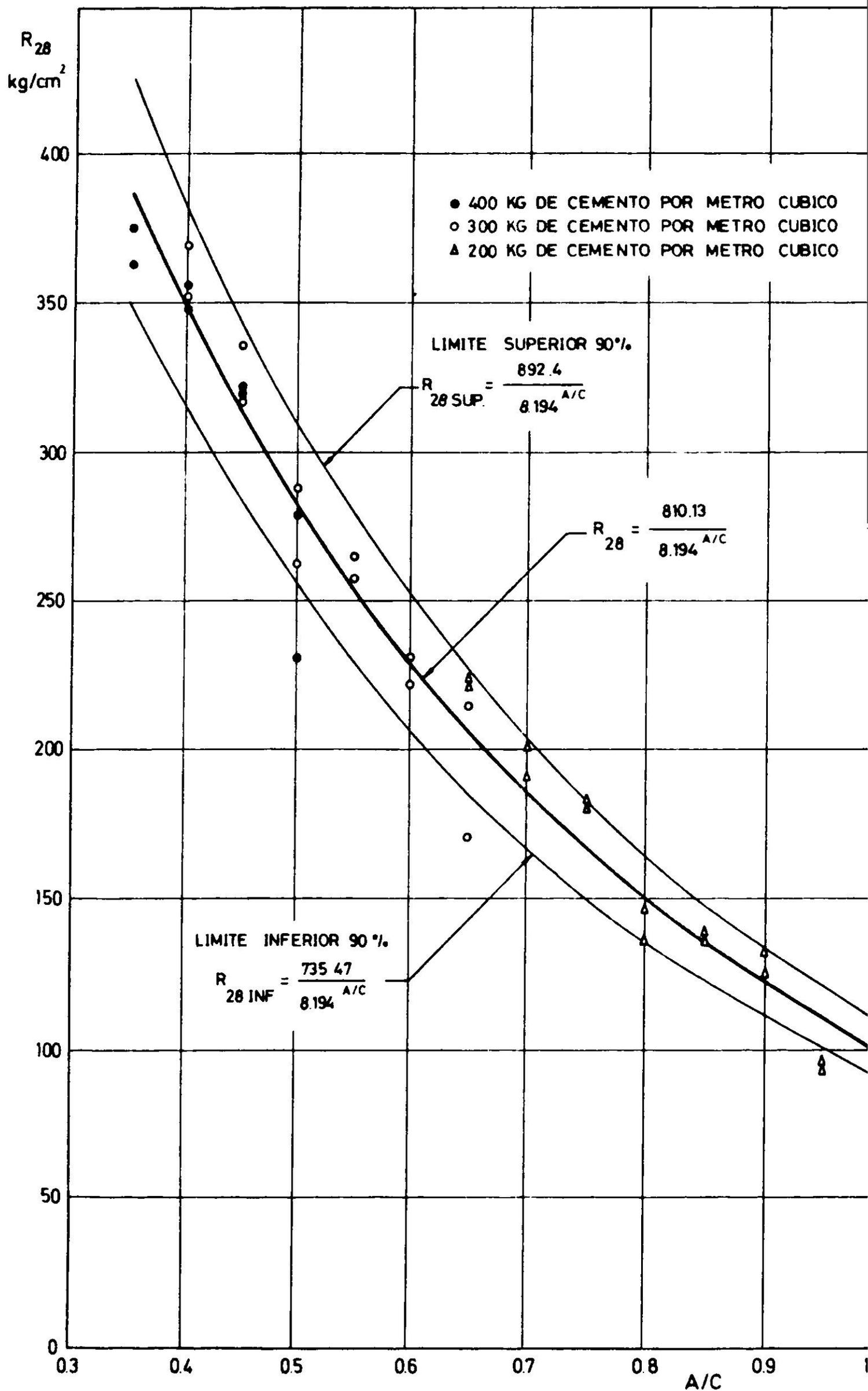


Fig. 5. Relación entre la resistencia a 28 días y la razón agua-cemento para cemento Super Mel

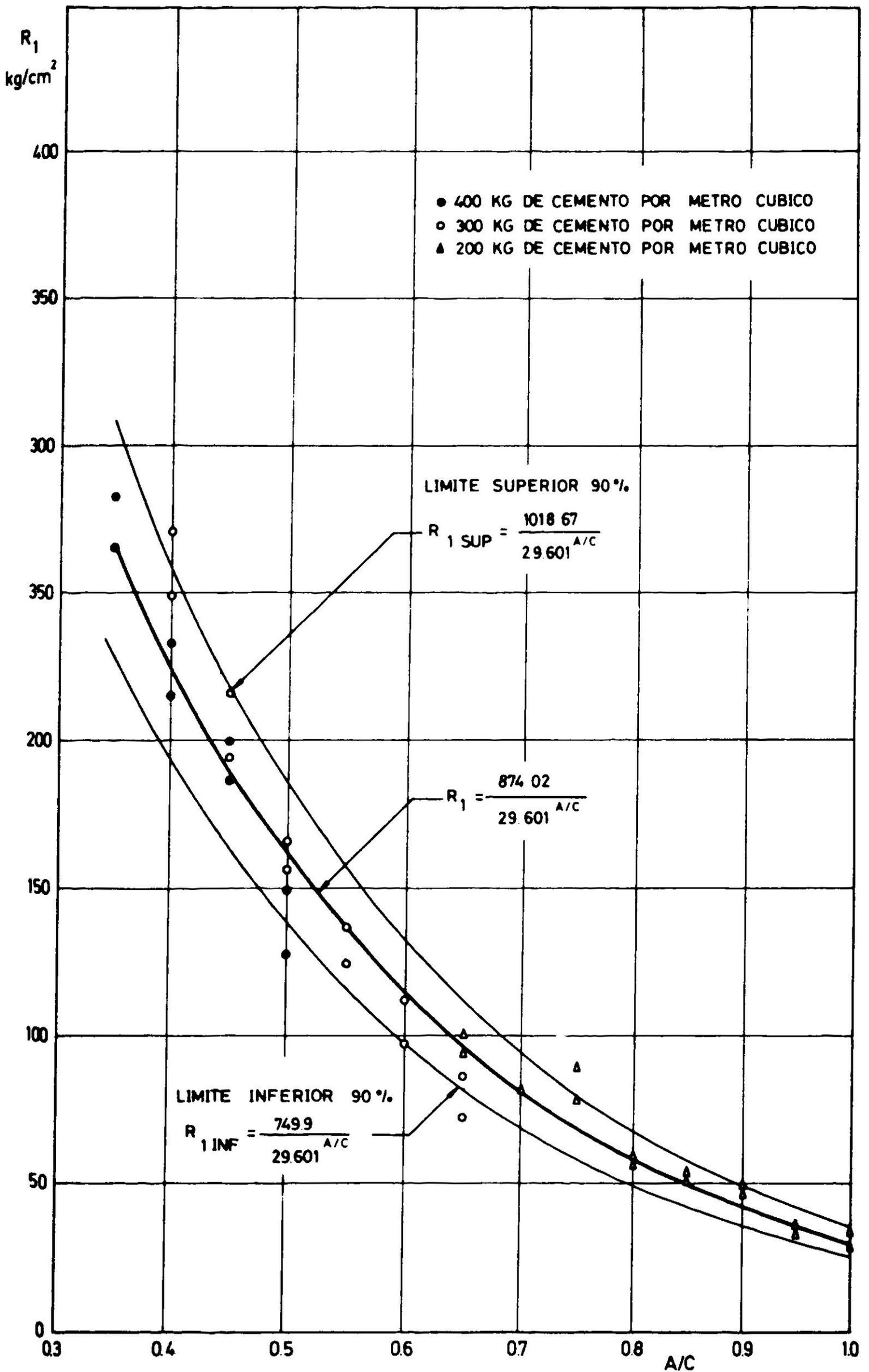


Fig. 6. Relación entre la resistencia acelerada y la razón agua-cemento para cemento Super Melón.

Se procedió, por lo tanto, a calcular la línea de regresión, directamente entre los valores de resistencia obtenidos en los dos ensayos.

La regresión encontrada, con sus correspondientes límites de confianza, es la siguiente:

$$\text{línea de regresión} \quad R_{28} = 12.54 R_1^{0.612}$$

$$\text{límite superior} \quad R_{28} = 13.93 R_1^{0.612}$$

$$\text{límite inferior} \quad R_{28} = 11.28 R_1^{0.612}$$

La regresión así encontrada no difiere prácticamente de la deducida analíticamente.

En Fig. 7 se muestra la regresión y sus límites de confianza.

Tal como se señaló en los antecedentes, Malhotra y Zoldners proponen, para tratamientos similares una regresión de la forma:

$$R_{28} = \frac{R_1}{a R_1 + b}$$

A partir de nuestros valores hemos analizado estadísticamente un ajuste de este tipo, el cual representa una recta en ejes coordenados con $X = 1/R_1$ y $Y = 1/R_{28}$. Se llega a la conclusión de que, en nuestro caso, la expresión propuesta no representa adecuadamente el fenómeno.

Cemento Polpaico Especial

Relación entre la resistencia a 28 días y la razón agua-cemento. Para las 40 coladas analizadas, la expresión obtenida y los límites de confianza entre los cuales existe un 90 % de probabilidad de encontrar el valor R_{28} que corresponde a una razón A/C dada, es:

$$\text{línea de regresión} \quad R_{28} = \frac{1114.5}{22.83^{A/C}}$$

$$\text{límite superior} \quad R_{28} = \frac{1302.5}{22.83^{A/C}}$$

$$\text{límite inferior} \quad R_{28} = \frac{953.6}{22.83^{A/C}}$$

El gráfico que representa estas expresiones se encuentra en Fig. 8.

Relación entre la resistencia acelerada y la razón agua-cemento. Si aceptamos que la expresión de Abrams representa adecuadamente el fenómeno, la regresión obtenida, con los límites de confianza 90%, es la siguiente:

$$\text{línea de regresión} \quad R_1 = \frac{753.8}{30.31^{A/C}}$$

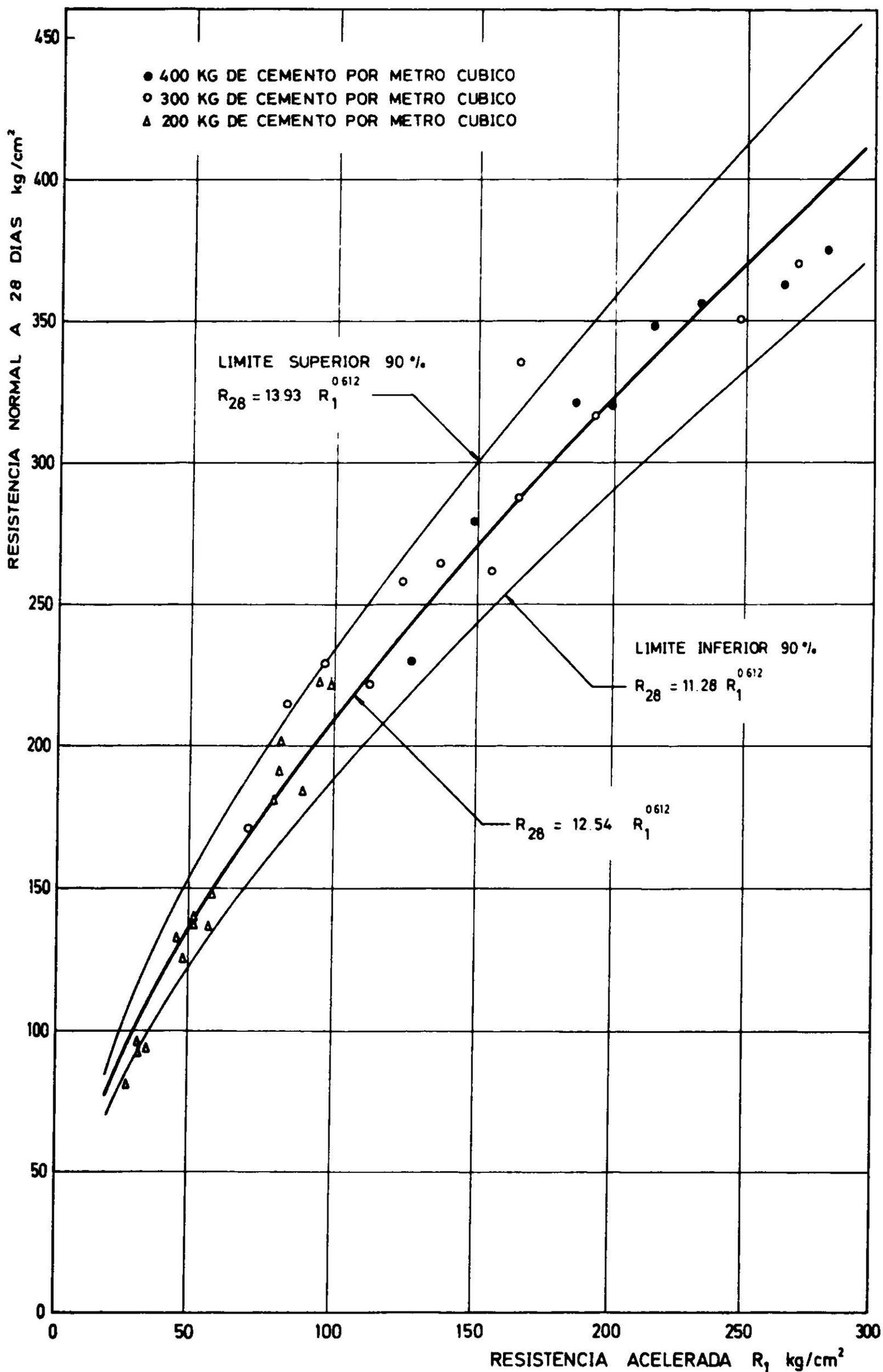


Fig. 7. Relación entre la resistencia a 28 días y la resistencia acelerada para cemento Super Melón.

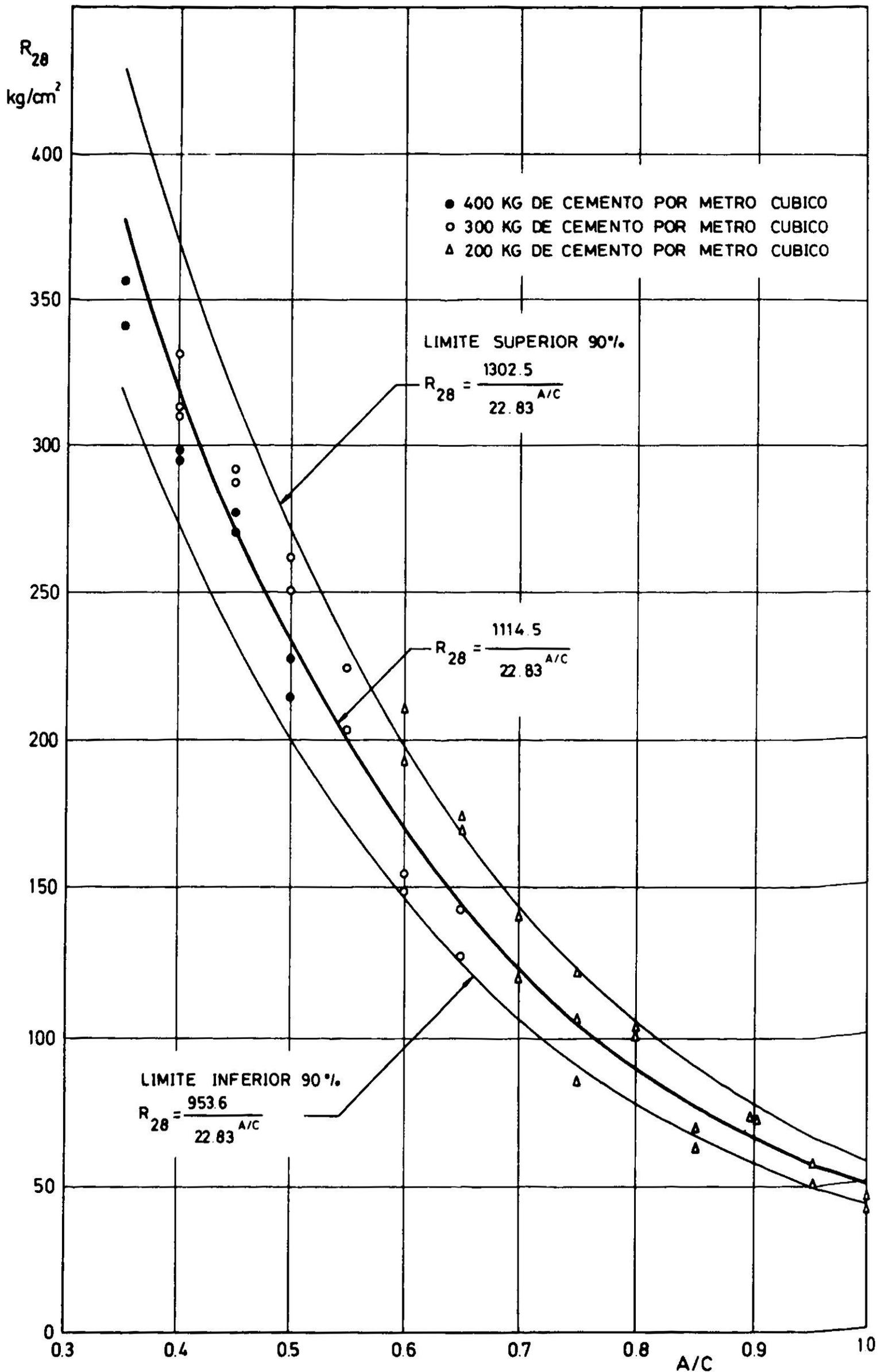


Fig. 8. Relación entre la resistencia a 28 días y la razón agua-cemento para cemento Polpaico Especial.

$$\text{límite superior } R_1 = \frac{893.7}{30.31^{1/C}}$$

$$\text{límite inferior } R_1 = \frac{635.85}{30.31^{1/C}}$$

En Fig. 9 se encuentran estas expresiones representadas gráficamente. Relación entre la resistencia acelerada y la resistencia normal. La expresión analítica que relaciona estas resistencias entre sí es:

$$R_{28} = 2.52 R_1^{0.917}$$

Si calculamos directamente la regresión entre R_1 y R_{28} , la relación que se obtiene y los límites de confianza entre los cuales existe un 90% de probabilidad de encontrar el valor R_{28} que corresponde a un valor de R_1 dado, es:

$$\text{línea de regresión } R_{28} = 2.73 R_1^{0.903}$$

$$\text{límite superior } R_{28} = 3.15 R_1^{0.903}$$

$$\text{límite inferior } R_{28} = 2.36 R_1^{0.903}$$

El gráfico que representa estas expresiones se encuentra en Fig. 10.

La disposición de los puntos en el gráfico nos ha sugerido, con fines prácticos, intentar un ajuste lineal. Hecho el análisis estadístico correspondiente llegamos a la conclusión de que una regresión de este tipo no representa adecuadamente el fenómeno.

Influencia del tipo de cemento en la relación R_{28} vs. R_1

Las líneas de regresión correspondientes a cada tipo de cemento difieren significativamente, lo que impide representarlas mediante una línea teórica de regresión común. Esto significa que la relación entre las resistencias acelerada y normal, depende del tipo de cemento empleado.

En Fig. 11 hemos representado ambas líneas de regresión, para hacer resaltar esta influencia.

DISCUSION

En la comparación entre los resultados de ésta y de otras investigaciones, debe considerarse, en primer lugar, que la aceleración de las resistencias está lograda en ellas por métodos de curado muy diversos. Por otra parte, como el tipo de cemento tiene marcada influencia en la relación R_1/R_{28} , es de esperar que, para investigaciones realizadas en el extranjero, con cementos de distintas características, no se

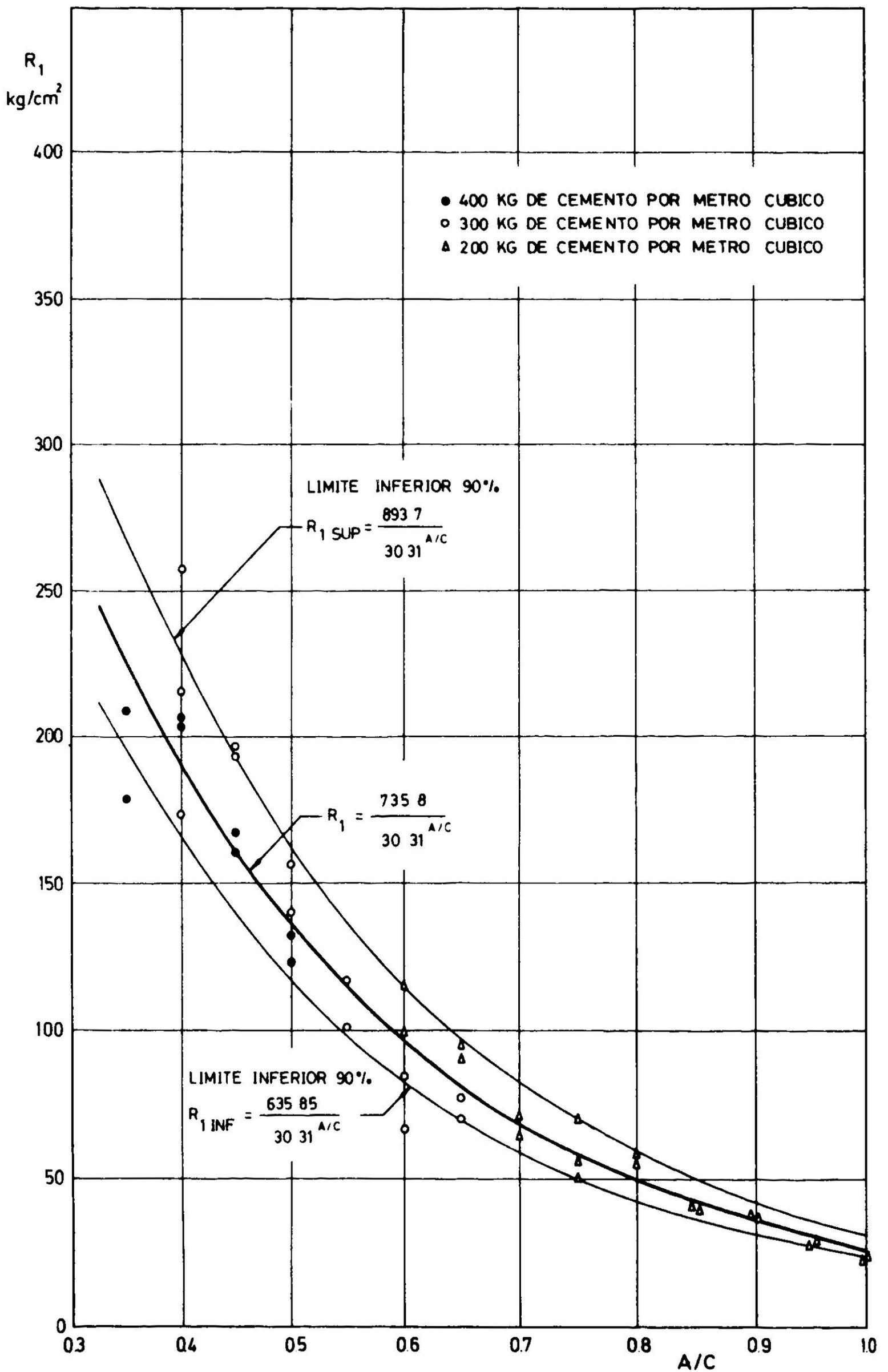


Fig. 9. Relación entre la resistencia acelerada y la razón agua-cemento para cemento Polpaico Especial.

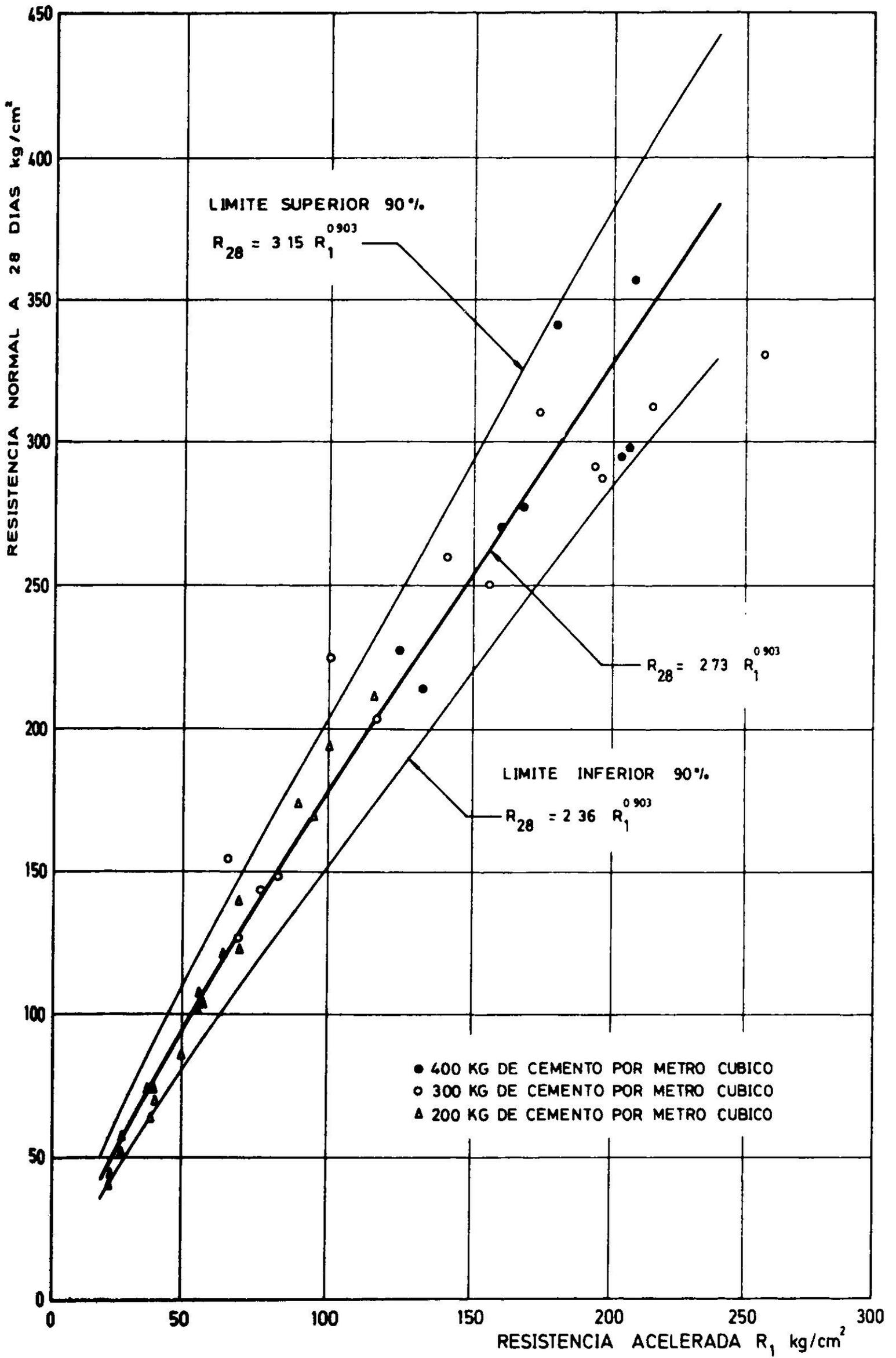


Fig. 10. Relación entre la resistencia a 28 días y la resistencia acelerada para cemento Polpaico Especial.

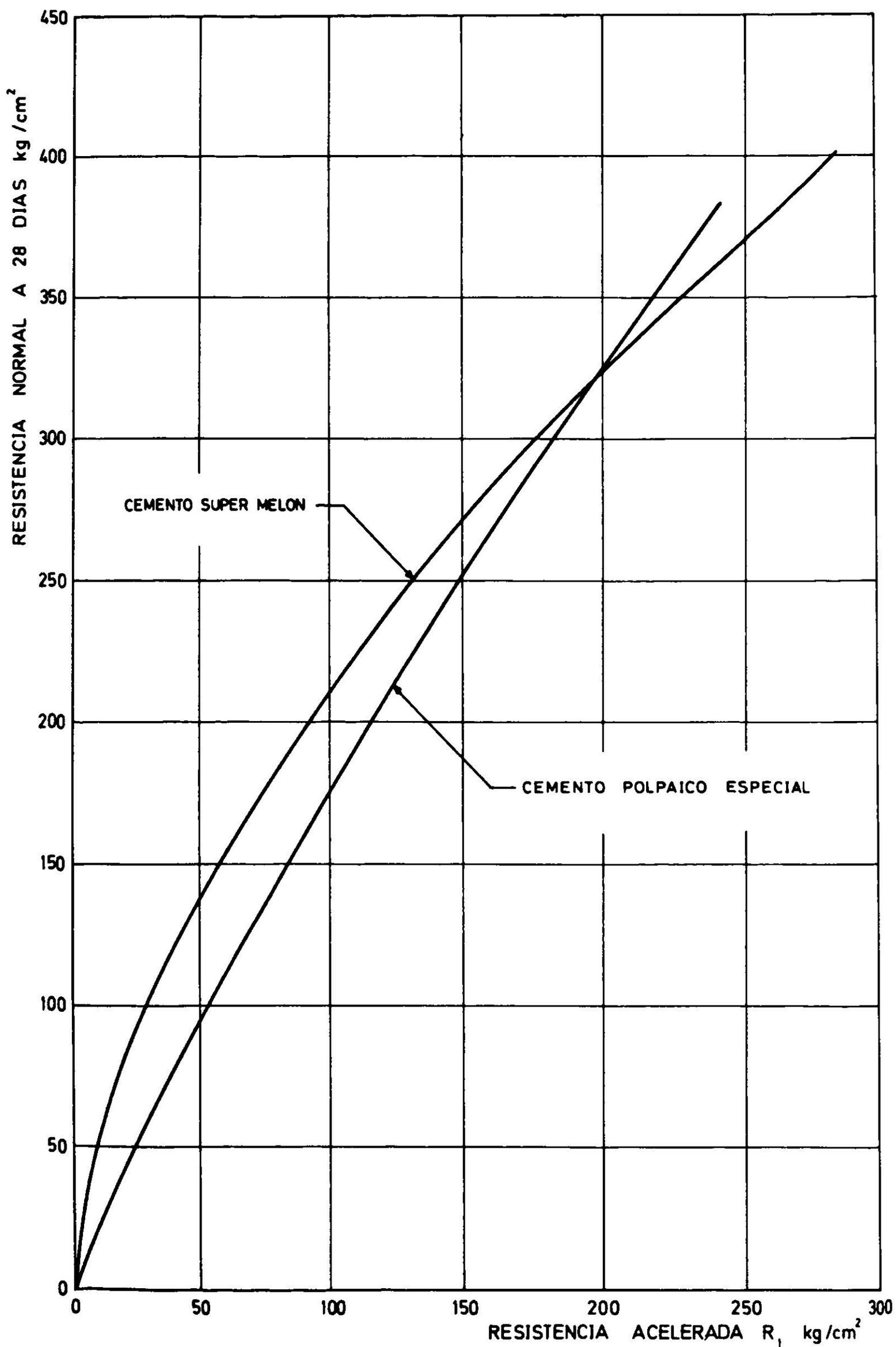


Fig. 11. Relaciones entre resistencias a 28 días y la resistencia acelerada para los dos cementos.

puedan incluir correlaciones análogas a las muestras. Nos limitaremos por lo tanto a hacer comparaciones generales para estimar la aplicabilidad práctica del ensayo acelerado.

Estudio de la resistencia

Lo ideal sería que el método de curado acelerado produjese una resistencia próxima a la de 28 días en curado normal. Esa resistencia nos garantizaría la inclusión en ella de todos los factores que a baja resistencia no alcanzan a manifestarse, como, por ejemplo, una mala calidad del árido.

Relación R_1/R_{28}

De los resultados obtenidos en nuestras experiencias, inferimos que esta razón no es constante, sino que varía con la resistencia y además depende del tipo de cemento.

De las expresiones obtenidas para deducir R_{28} a partir de R_1 , se desprenden las siguientes relaciones:

$$\text{cemento Super Melón; } R_1/R_{28} = 0.0797 R_1^{0.388} = 0.0160 R_{28}^{0.634}$$

$$\text{cemento Polpaico Especial; } R_1/R_{28} = 0.366 R_1^{0.097} = 0.309 R_{28}^{0.107}$$

Dentro de los rangos de resistencia R_{28} logrados, esas expresiones varían entre 0.26 y 0.69 para Super Melón y desde 0.49 a 0.62 para Polpaico Especial.

En el caso del cemento Polpaico Especial, la relación no es muy variable, lo que gráficamente se manifiesta en la poca curvatura de su línea de regresión, que se asemeja en ello a las obtenidas por otros investigadores, pero presentando la ventaja de tener mayores valores de la relación R_1/R_{28} .

En el cemento Super Melón la mayor variación de esa relación se evidencia en la fuerte curvatura de su línea de regresión, la cual corta a la de Polpaico en el punto $R_1 = 189 \text{ kg/cm}^2$, $R_{28} = 310 \text{ kg/cm}^2$ y por lo tanto $R_1/R_{28} = 0.61$. Para resistencias inferiores a éstas, la relación es mayor para Polpaico que para Super Melón, y al revés para resistencias superiores.

Conviene observar que los rangos de variación de R_1/R_{28} se han obtenido en una amplia gama de resistencias, con razones A/C entre 1.00 y 0.35, siendo precisamente en las resistencias más bajas donde las relaciones R_1/R_{28} son menores y, por tanto, más desfavorables. Esto ocurre sobre todo para el cemento Super Melón que en esa zona difiere más fuertemente del Polpaico Especial. Si consideramos hormigones usuales con razones A/C entre 0.60 y 0.40, los valores de las relaciones R_1/R_{28} oscilan entre 0.50 y 0.66 para Super Melón y entre 0.57 y 0.61 para Polpaico Especial, con lo que no solamente disminuye la variación, sino que además se diferencian menos entre sí las relaciones en ambos cementos.

Otros autores empleando los métodos descritos en los antecedentes confirman la dependencia entre la razón R_1/R_{28} y el valor absoluto de la resistencia;

sin embargo los rangos en que varían difieren en cada una de ellas. Así por ejemplo Dutron¹⁰ empleando cementos portland y siderúrgicos, obtiene una regresión común, en la cual la razón R_1/R_{28} varía entre 0.5 y 0.6. Malhotra² por su parte utilizando un cemento de bajo calor de fraguado, obtiene valores de la razón R_1/R_{28} que varían entre 0.30 y 0.42. Con el método de Akroyd, modificado por Malhotra y Zoldners⁶, empleando cementos portland normal tipo I (designación ASTM), obtienen razones que varían entre 0.24 y 0.65. Smith y Chojnacki⁸, utilizando el método del Departamento de Caminos de Ontario y cemento tipo I obtienen un rango de variación de la razón entre 0.47 y 0.61.

La Fig. 12 muestra una comparación entre el método desarrollado por nosotros y los estudiados por los autores mencionados.

Ganancia de resistencia

En este punto estudiaremos el aumento de resistencia de un hormigón al ser sometido a un tratamiento térmico.

Llamaremos R_0 el valor de la resistencia a la compresión de probetas sometidas a un curado normal durante un tiempo igual a la duración total del curado acelerado tomado desde el momento de la confección; llamaremos, en general, R_1 la resistencia a la compresión obtenida en probetas que han sido sometidas al tratamiento térmico. Entonces, la "ganancia de resistencia" será la razón

$$G = \frac{R_1 - R_0}{R_0} \times 100$$

Los valores de G los hemos determinado para ambos tipos de cemento mediante un hormigón de razón agua-cemento igual a 0.50 y una dosis de cemento de 300 kg/m³. Por tratarse de una dosificación única, obtendremos un valor particular de la ganancia que tomaremos como referencia para poder comparar con otros autores. No hemos dado una mayor extensión a este punto, pues escapa a los propósitos de la investigación.

Los valores de R_0 y R_1 se obtuvieron promediando las resistencias de 2 probetas compañeras y la ganancia que de ellas se deduce se muestran a continuación:

GANANCIA DE RESISTENCIA PARA AMBOS CEMENTOS

Tipo de cemento	R_0 kg/cm ²	R_1 kg/cm ²	Ganancia %
Polpaico Especial	52	134	158
Super Melón	60	138	130

Para ambos cementos, el tratamiento térmico propuesto acelera notablemente las reacciones de hidratación. Es extraño, por lo tanto, que Smith y Chojnacki⁸ afirmen que largos tiempos de precurado aminoran el efecto del trata-

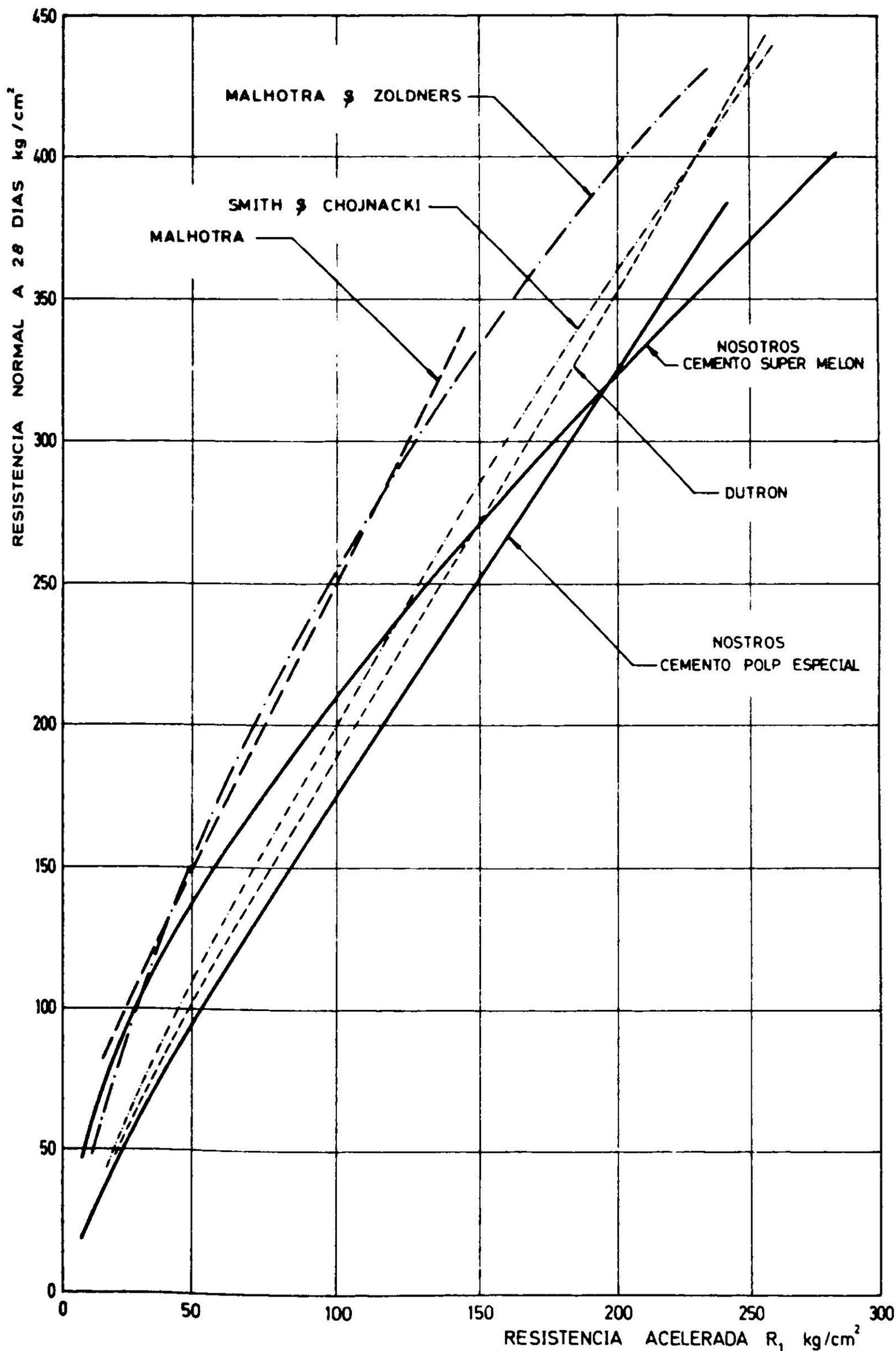


Fig. 12. Relación entre resistencias a 28 días y la resistencia acelerada lograda por diversos métodos.

miento en agua caliente hasta anularlo para períodos mayores de 20 horas. Zoldners indica que un tal comportamiento sólo puede tener como causa el haber empleado un tipo especial de cemento, ya que él obtuvo experimentalmente ganancias que varían entre 38% y 238%, dependiendo de la dosificación empleada.

Dispersión

El coeficiente de variación entre probetas compañeras es del mismo orden en el ensayo acelerado que en el normal.

En cuanto al error de la predicción de R_{28} a partir de R_1 , ha quedado expresado analítica y gráficamente por los límites de confianza 90%, los cuales están a 10.6% de distancia de la línea de regresión en el cemento Super Melón y a 14.5% en el Polpaico Especial. Estos errores son similares a los obtenidos por otros investigadores.

Malhotra obtuvo regresiones que permiten predecir la resistencia a los 28 días con un error máximo que varía entre 15.2 y 23.6% dependiendo del tipo de hormigón. A primera vista estos valores parecen demasiado altos; sin embargo, el autor destaca que se trataba de un control en terreno y en condiciones bastante desfavorables y estima que un valor del 15% puede asignarse a su método si se desarrolla en condiciones más adecuadas.

El método de Akroyd modificado, desarrollado por Malhotra y Zoldners, permite predecir la resistencia a los 28 días con un error de aproximadamente 12% para los límites de confianza 90%.

Dutron, por su parte, obtiene una regresión mediante la cual es posible predecir R_{28} con un error máximo del 15%.

CONCLUSIONES

1. El método térmico propuesto provoca un notorio aumento de resistencia del hormigón que, para una dosificación ensayada, resultó ser de 130% con cemento Super Melón (portland) y de 158% con cemento Polpaico Especial (portland puzolánico).
2. La relación entre la resistencia con curado acelerado a 1 día y con curado normal a 28 días depende del tipo de cemento, y para un mismo cemento esa relación es tanto mayor cuanto mayor es la resistencia normal del hormigón.
3. Dentro de la amplia gama de resistencias ensayadas, con razones agua/cemento entre 1.00 y 0.35, la resistencia acelerada varió entre 25% y 70% de R_{28} con cemento Super Melón, y entre 49% y 63% con Polpaico Especial. Para razones agua/cemento más usuales, entre 0.60 y 0.40, esa relación varió entre 0.50 y 0.66, y entre 0.57 y 0.61, respectivamente con los dos tipos de cemento.

4. La relación entre la resistencia con curado acelerado R_1 y con curado normal R_{28} queda expresada por las siguientes líneas de regresión:

$$\text{cemento Super Melón} \quad R_{28} = 12.54 R_1^{0.612} \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{cemento Polpaico Especial} \quad R_{28} = 2.73 R_1^{0.903} \text{ kg/cm}^2$$

5. El método propuesto permite predecir, a las 29 horas, la resistencia del hormigón a los 28 días con un error máximo (al nivel 90%) de 10.6% para el cemento Super Melón y de 14.5% para el cemento Polpaico Especial.
6. En morteros RILEM existe también buena correlación entre la resistencia acelerada y la normal a 28 días.
7. Dentro de los valores habituales, la resistencia del mortero RILEM a 28 días puede inferirse de la obtenida a 1 día con curado acelerado por las siguientes expresiones:

$$\text{cemento Super Melón} \quad R_{28} = 1.571 R_1$$

$$\text{cemento Polpaico Especial} \quad R_{28} = 1.657 R_1$$

8. Las expresiones del punto anterior permiten predecir la resistencia del mortero a 28 días con un error máximo de 2% para el cemento Super Melón y de 7% para el cemento Polpaico Especial, ambos con límites de confianza 90%.

BIBLIOGRAFIA

1. PIÑEIRO, M. Relación entre las resistencias a compresión de hormigones a 7 y 28 días. *Revista del IDIEM*, vol. 2, n° 1 (abril 1963), pp. 33-44.
2. MALHOTRA, V.M. Analyses of accelerated 24-hour concrete strengths from field tests. *Bulletin RILEM*, n° 31, junio 1966.
3. NURSE, R.W. Principes physiques et chimiques et méthodes de durcissement accéléré du béton. *Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions. Cahiers de la Recherche*, n° 25, abril 1967.
4. PATCH, D.G. An 8-hours accelerated strength test for field concrete control. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings* 4-5, marzo 1933.
5. CORNWELL, J.S. The reliability of the 24-hour compressive strength of accelerated-cured concrete as a basis for predicting the strength of standard-cured concrete aged 28 and 90 days. *Construction Material Report*, n° S.M. 53. Snowy Mountains Hydro-Electric Authority, Australia, 1956.
6. AKROYD, T.N.W. The accelerated curing of concrete test cubes. *The Institution of Civil Engineers, Proc.*, vol. 19, año 1961.
7. MALHOTRA, V.M. y ZOLDNERS, N.G. Accelerated strength testing of concrete using a boiling method. *Bulletin RILEM*, n° 31, junio 1966.
8. SMITH, P. y CHOJNACKI, B. Accelerated strength testing of concrete cylinders in Ontario. *American Society for Testing and Materials, Proceedings*, vol. 63, 1963. Resumen en *Bulletin RILEM*, n° 31, 1966.

9. JAROCKI, W. The rapid control of concrete strength on the basis of specimens cured in hot water. *Bulletin RILEM*, nº 31, junio 1966.
10. DUTRON, R. Quelques résultats d'essais en contribution a le colloque RILEM. *Bulletin RILEM*, nº 31, junio 1966.
11. DUBOIS, J. Rapport du chef du laboratoire d'essais des matériaux de la ville de Paris. *Bulletin RILEM*, nº 31, junio 1966.
12. REINSDORF, S. Perfectionnements techniques apportés au traitement a la vapeur a basse pression et au chauffage du béton a des temperatures inferieures a 100°C. *Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions. Cahiers de la Recherche*, nº 25, abril 1967.
13. MIRONOV, S.A. *Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening*. Citado en 12.
14. THORVALDSON, T. *Symposium on the chemistry of cement*. Stockholm, 1938. Citado en Cahiers de la Recherche, nº 25.
15. SAUL, VERBECK y otros. Curado en vapor a baja presión. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 60, nº 8, (agosto 1963).
16. ASTM C 33-67. *Specifications for concrete aggregates*.
17. INDITECNOR 30-27ch. *Cemento Portland*.
18. INDITECNOR 30-93ch. *Cemento Portland Puzolánico*.
19. ACI 613-54. *Instrucciones para dosificar hormigones de modo rápido*. Traducido y adaptado por Moisés Piñeiro Fuentes.
20. INDITECNOR 5-3. *Selección de muestras al azar*.

ACCELERATED TESTS OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH

SUMMARY:

A method is analysed for making an early estimation of the compressive strength of concrete at 28 days. It consists in exposing the samples to accelerated curing in boiling water during 4 hours, 24 hours after its preparation. The effect of various factors, such as precuring time, temperature and duration of curing, postcuring time, were studied. The results made it clear that the 28 days compressive strength of concrete may be predicted 29 hours after its preparation within 13% approximation.