

**PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN DE CEMENTO
PORTLAND POR EL MÉTODO DE CURADO ACELERADO**

Ing. Washington Cano Olazábal*

Ing. Luis P. Traversa **

Ing. Jorge H. Giusi

- * Jefe de la Sección Tecnología del Hormigón del LEMIT.
- ** Jefe de la Sección Estructuras del LEMIT.

INTRODUCCION

En este informe se exponen las conclusiones a que se ha arribado empleando el método de curado acelerado, mediante agua en ebullición. Dicho método permite obtener valores de resistencia a la edad de un día, los cuales pueden ser relacionados gráfica y/o analíticamente con los valores de resistencia a compresión a 28 días. La necesidad de predecir a edades tempranas la resistencia del hormigón a 28 días ha sido una inquietud permanente de los técnicos, que no siempre ha arrojado resultados positivos. Los valores de resistencia obtenidos en el ensayo de probetas curadas en forma normal y ensayadas a edades menores de 7 días son difícilmente relacionables con los valores a 28 días.

El interés de conocer la resistencia del hormigón a 28 días se debe a que es la resistencia con que habitualmente se trabaja en cálculos y por lo tanto la que se indica en las especificaciones.

La resistencia del hormigón depende de varios factores y es un índice de su calidad. Diversas propiedades, como ser durabilidad, impermeabilidad, etc., son generalmente mayores cuanto mayor es la resistencia.

Los factores principales relacionados con la resistencia del hormigón, considerando un mismo tipo de cemento, son la razón agua/cemento y las características de los áridos.

El LEMIT, tomando como base los estudios sobre pronósticos de resistencia por métodos acelerados realizados por distintos investigadores y laboratorios, y considerando la necesidad de contar con un método práctico capaz de obtener resultados con una variación razonable, optó por analizar el trabajo realizado por Malhotra, Zoldners y Lapinas, (2) y posteriormente el realizado por Castiarena, (3).

Los ensayos preliminares realizados en este laboratorio adoptando la función hiperbólica:

$$Y = \frac{X}{AX + B}$$

dada por los autores citados en primer término, como así también la adoptada por Castiarena, quien modifica aunque no sustancialmente la constante B de la misma, indica que los pronósticos realizados en estas condiciones arrojaban valores con una dispersión del orden del 25 por ciento con respecto a los resultados de ensayos de probetas curadas en forma normal. Tales pronósticos no son satisfactorios para predecir en forma adecuada la resistencia, especialmente de los hormigones que en forma continua y rutinariamente ensaya el LEMIT.

No obstante, dado lo práctico del método y antes de desecharlo su uso, se estudiaron minuciosamente las posibles causas de este inconveniente. En los estudios realizados por Malhotra y colaboradores (2), se observa que para los hormigones elaborados con áridos de tamaño máximo 38 mm ($1\frac{1}{2}$ "), en la función hiperbólica la constante B tiene un valor de 0,40. Con dicho valor los pronósticos realizados en las dosificaciones ejecutadas mejoraron notablemente, encontrándose una dispersión del 10 por ciento.

En el trabajo citado también se pone énfasis en las posibles variaciones que podrían encontrarse debido al tipo de cemento utilizado y se recomienda realizar estudios y obtener curvas de relación para cada caso en especial.

Este hecho fue el que alentó para proseguir con los estudios y llegar a la conclusión de que la influencia del tamaño máximo, como así también el tipo de cemento, eran factores importantes a tenerse en cuenta. Se eligió un cemento normal, distintos tipos de áridos de uso común en nuestro medio y sobre todo se mantuvo en todos los casos un tamaño máximo de 38 mm ($1\frac{1}{2}$ ").

Los áridos utilizados fueron canto rodado, piedra partida granítica, piedra partida cuarcítica y arenas naturales de distintas granulometrías.

DESCRIPCION DEL METODO

El método empleado corresponde al especificado en la nor-

ma ASTM C-684-73 T, con algunas variaciones introducidas por razones de uso práctico.

En el procedimiento elegido las operaciones que se efectúan son las que se detallan a continuación:

- a) Moldeo de las probetas en forma similar a las que se someten al curado normal.
- b) Mantenimiento de las probetas en cámara húmeda en las mismas condiciones que para el curado normal, durante un período de 24 horas a contar desde la terminación del moldeo.
- c) Desmolde e inmersión inmediata de las probetas en agua en ebullición, en la que se mantienen durante 3 horas 30 minutos.
- d) Retiro de las probetas del agua, enfriado, encabezado con mezcla plástica de azufre y grafito y ensayo a la rotura por compresión a las 28 horas 30 minutos del moldeo.

Se aclara que por razones prácticas se modificó el procedimiento del encabezado de las probetas, ya que al ejecutarlo con la mezcla plástica se despegaba, dado el grado de humedad de las mismas. Por dicha circunstancia se sustituyó el encabezado por un alisado con mortero en base a cemento de alta resistencia inicial, efectuado 8 horas después del moldeo de las probetas.

El enfriado de las probetas se realizó por medio de un proceso gradual de baño de agua, desde 80°C hasta temperatura normal, en un período de 60 minutos.

EQUIPOS

En las experiencias realizadas se utilizó un recipiente de acero con tapa. En el fondo del mismo se ubicó un piso rejilla separado 3 centímetros, y un quemador a gas regulable. La temperatura del agua fue controlada por termómetro de in-

T A B L A I

CEMENTO NORMAL

Ensayos físicos

Agua para pasta normal.....	22,5 %
Retenido sobre tamiz IRAM 74 μ (Nº 200)....	13,2 %
Expansión en autoclave.....	0,02 %
Tiempo de fraguado:	
Inicial.....	2 h
Final.....	2 h 30 m
Superficie específica (Blaine).....	3 801 cm ² /g
Resistencia a compresión:	
7 días.....	403 kg/cm ²
28 días.....	551 kg/cm ²
Resistencia a flexión:	
7 días.....	82 kg/cm ²
28 días.....	91 kg/cm ²

Análisis químico

Residuo insoluble.....	1,2 %
Pérdida por calcinación.....	1,3 %
Anhídrido sulfúrico (SO ₃).....	2,2 %
Oxido de magnesio (MgO).....	0,8 %
Sílice soluble (SiO ₂).....	21,7 %
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃).....	3,3 %
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃).....	5,8 %
Oxido de calcio (CaO).....	61,9 %
Cal libre en CaO.....	0,34 %
Oxido de sodio (Na ₂ O).....	0,85 %
Oxido de potasio (K ₂ O).....	0,74 %

Composición potencial calculada

Silicato tricálcico (SC ₃).....	37,2 %
Silicato dicálcico (SC ₂).....	34,2 %
Aluminato tricálcico (AC ₃).....	9,8 %
Ferroaluminato tetracálcico (FAC ₄).....	10,0 %

mersión. Para facilitar la introducción y extracción de las probetas del agua en ebullición se confeccionaron unos aros de acero ajustables que permitían, mediante la utilización de ganchos, mover las probetas sin inconvenientes.

MATERIALES

Cemento portland

Se empleó un cemento portland normal cuyas propiedades físicas y análisis químicos se informan en la tabla I.

Aridos

Como árido fino, en las experiencias se emplearon arenas naturales cuya identificación mineralógica es arena silícea (denominada comercialmente "arena argentina") y arena sílico-calcárea (denominada comercialmente "arena oriental"), como así también una mezcla de ambas.

Los ensayos realizados sobre las arenas se informan en la tabla II.

Como áridos gruesos se emplearon los siguientes:

- a) Piedra partida granítica (migmatita granítica).
- b) Canto rodado (rodados de cuarzo y calcedonia).
- c) Piedra partida cuarcítica (arenisca silícea).

Los ensayos realizados sobre estos áridos se informan en la tabla III.

Agua de mezclado y curado

Se empleó el agua de la red de distribución de la ciudad de La Plata.

T A B L A II

Material	Ensayo colorimétrico (p.p.m.)	P.U.V. (t/m ³)	P.e. s y as	P.e. seco	Absorción 24 horas (%)	Tamiz 200 (%)
Arena oriental	100	1,71	2,61	2,59	0,2	0
Arena argentina	100	1,52	2,62	2,58	0,4	1

Granulometría

Material	% que pasa tamiz N°					M.F.
	4	8	16	30	50	100
Arena oriental	100	90	55	34	23	2,96
Arena argentina	-	100	99	93	58	1,43

Nota.- En distintos dosajes se empleó una arena producto de la mezcla constituida por 30 por ciento de arena argentina y 70 por ciento de arena oriental.

T A B L A III

Material	P.U.V. (t/m ³)	P.e. s y s s	Absorción 24 horas (%)	Absorción 30 min (%)
Piedra partida granítica	1,39	2,70	0,5	-
Piedra partida cuarcítica	1,34	2,50	1,9	1,2
Canto rodado	1,53	2,58	0,1	-

Granulometría

Material	% que pasa tamiz					M.F.
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	
Piedra partida granítica	100	97	43	16	6	7,52
Piedra partida cuarcítica	100	92	52	10	1	7,47
Canto rodado	100	95	77	45	24	6,97

NORMAS PARA REALIZAR LOS ENSAYOS

Para la determinación de la consistencia se empleó el método del tronco de cono IRAM 1536, para la preparación y curado de las probetas de 15 x 30 centímetros, el método IRAM 1534 y para determinar la resistencia cilíndrica de rotura a compresión, el método IRAM 1546.

DISPOSICIONES GENERALES REFERENTES A LA MEDICION DE LOS MATERIALES Y AL MEZCLADO DE LOS HORMIGONES

Todos los materiales, incluyendo el agua, fueron medidos antes de ser introducidos en la hormigonera, en peso. El mezclado se realizó en hormigonera mecánica de tambor basculante, girando el tambor a razón de 20 rpm. Los pastones se elaboraron en la siguiente forma:

a) Mezclado durante 2 minutos, contados a partir del momento en que todos los materiales, incluso el agua, ingresaron en la hormigonera.

b) Detención de la hormigonera durante 3 minutos.

c) Remezclado durante 1 minuto y luego descarga; una vez realizada la descarga sobre una bandeja metálica, se procedió a mezclar nuevamente el hormigón manualmente para tratar de corregir cualquier segregación que se hubiera producido durante la descarga.

HORMIGONES PREPARADOS PARA REALIZAR LA EXPERIENCIA

En la tabla IV se detallan las cantidades de materiales

en kilogramos que se utilizaron para preparar un metro cúbico de hormigón. Cada pastón fue repetido en tres días distintos.

A fin de establecer las características del hormigón fresco, sobre el mismo se realizó el ensayo de consistencia (método del tronco de cono). En todos los casos se trabajó con asentamientos comprendidos entre 6 ± 2 cm.

MOLDEO Y CURADO DE LAS PROBETAS DE ENSAYO

Se moldearon 10 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm por pastón, de las cuales 4 fueron sumergidas a la edad de un día en agua en ebullición. Las restantes fueron mantenidas en sus moldes durante 48 horas, y luego hasta la edad de ensayo en la cámara de temperatura y humedad constantes (humedad relativa superior al 95 por ciento y temperatura $21 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$).

RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION

Los valores graficados que se consignan en este informe corresponden a 84 pastones. Los mismos han permitido relacionar en forma adecuada las resistencias obtenidas a 28 horas 30 minutos, bajo condiciones de curado acelerado, con las ensayadas a la edad de 28 días bajo condiciones normales de curado. Dichos valores se han introducido en la función hiperbólica:

$$Y = \frac{X}{AX + B}$$

donde Y resistencia cilíndrica a compresión con curado normal a la edad de 28 días.

X resistencia cilíndrica a compresión con curado acelerado a la edad de 28 horas 30 minutos.

T A B L A IV

TABLA IV. CANTIDADES DE MATERIALES POR METRO CUBICO DE HORMIGON

Cemento (kg)	Agua (kg)	Pa/Pc	Arido fino (kg)	Arido grueso (kg)	Asentamiento (cm)
1. Arido grueso, piedra partida granfítica; árido fino, arena argentina					
250	172	0,68	786	1 121	4,5
300	175	0,58	744	1 107	4,0
350	174	0,50	752	1 076	4,5
400	178	0,44	710	1 058	5,5
2. Arido grueso, piedra partida granfítica; árido fino, arena oriental					
250	150	0,66	861	1 135	4,0
300	156	0,50	819	1 122	5,5
350	158	0,45	777	1 108	5,5
400	164	0,41	733	1 095	6,0
3. Arido grueso, piedra partida granfítica; árido fino, arena oriental 70 % - arena argentina 30 %					
250	155	0,62	814	1 165	4,0
300	156	0,52	778	1 157	8,0
350	157	0,45	742	1 149	5,5
400	160	0,40	702	1 138	6,0

4. Árido grueso, canto rodado; Árido fino, arena argentina						
250	150	0,60	807	1 180	4,0	
300	169	0,56	762	1 117	4,0	
350	169	0,48	757	1 108	4,0	
400	173	0,43	731	1 069	6,0	
5. Árido grueso, canto rodado; Árido fino, arena oriental						
250	154	0,62	820	1 154	8,0	
300	138	0,46	799	1 176	4,0	
350	148	0,43	773	1 133	6,0	
400	150	0,38	715	1 143	5,5	
6. Árido grueso, canto rodado; Árido fino, arena oriental 70 % - arena argentina 30 %						
250	156	0,62	820	1 159	6,5	
300	143	0,48	797	1 140	4,0	
350	150	0,43	773	1 138	5,0	
400	152	0,38	716	1 148	6,0	
7. Árido grueso, piedra partida cuarcítica; Árido fino, arena oriental 70 % - arena argentina 30 %						
250	160	0,64	810	1 066	6,5	
300	160	0,53	773	1 049	7,5	
350	165	0,47	752	1 029	5,5	
400	168	0,42	713	1 019	6,5	

GRAFICO 1

RELACION ENTRE RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A 28 DIAS
CON CURADO NORMAL - RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A
28,5 HORAS CON CURADO ACCELERADO

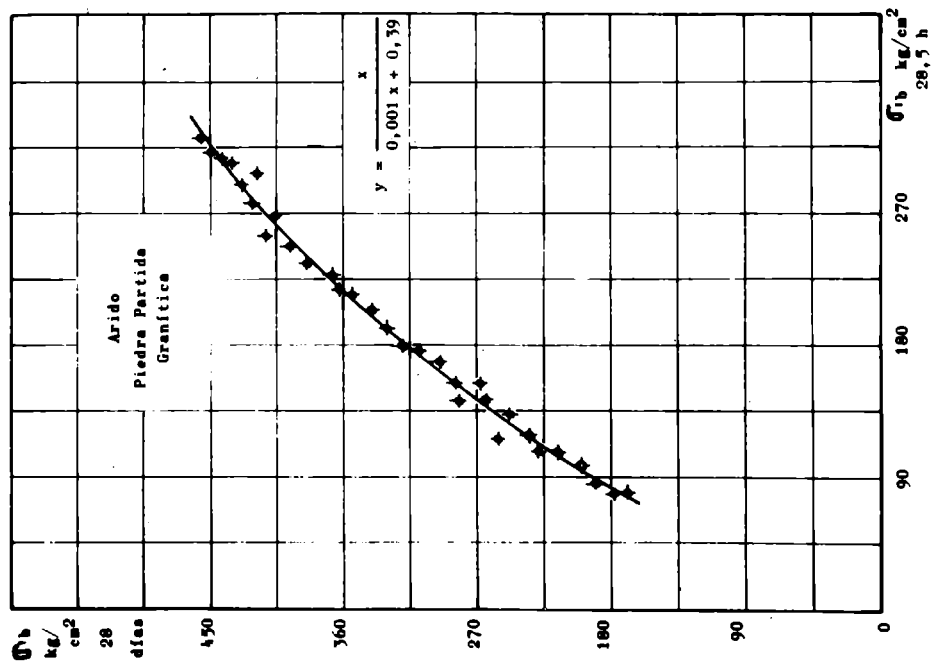
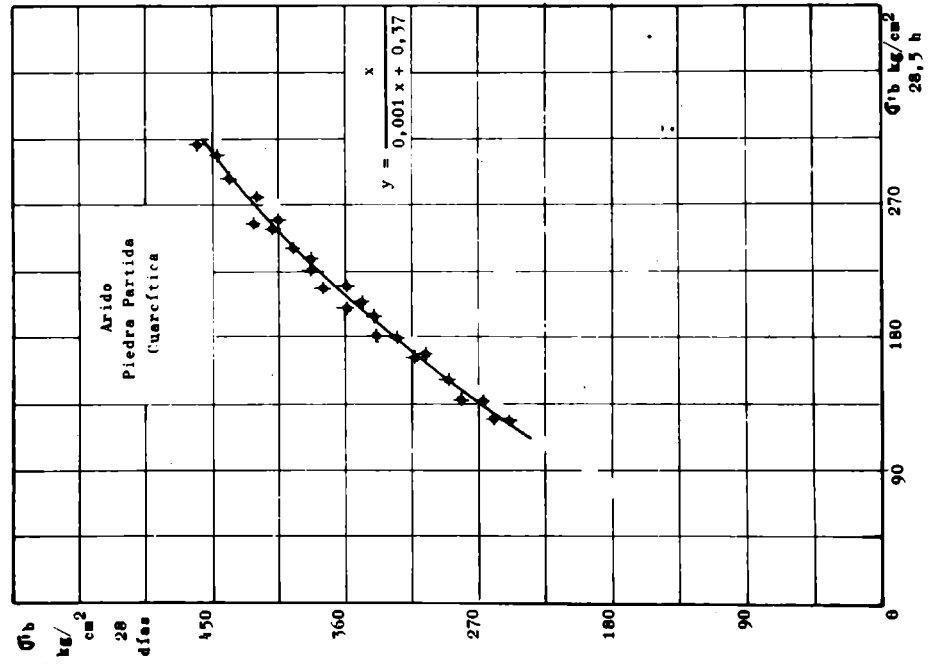


GRAFICO 2

RELACION ENTRE RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A 28 DIAS
CON CURADO NORMAL - RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A
28,5 HORAS CON CURADO ACCELERADO



A y B constantes.

La constante A es un coeficiente que define la curvatura y orientación de la función hiperbólica. Los valores que toma la constante A son de muy poca variación y en tal sentido se la utiliza en todos los casos como una constante fija, tomando un valor igual a 0,001. En cambio la constante B toma distintos valores fundamentalmente en función del tipo de cemento, influyendo también el tipo de árido y el tamaño máximo del árido grueso.

Con respecto a las relaciones de los valores entre los ensayos acelerados y los obtenidos con curado normal a la edad de 28 días, se han obtenido para los distintos áridos pequeñas variaciones en torno al valor de la constante B.

Dichos valores, como así también la expresión de la función hiperbólica para los agregados utilizados, se detallan a continuación:

$$\text{Piedra partida granítica} \quad Y = \frac{X}{0,001 X + 0,39} \quad (\text{Gráfico 1})$$

$$\text{Piedra partida cuarcítica} \quad Y = \frac{X}{0,001 X + 0,37} \quad (\text{Gráfico 2})$$

$$\text{Canto rodado} \quad Y = \frac{X}{0,001 X + 0,41} \quad (\text{Gráfico 3})$$

Debe hacerse notar que los hormigones confeccionados con áridos gruesos, piedra partida granítica y canto rodado, fueron proyectados con tres tipos granulométricos distintos de áridos finos y que, de acuerdo al módulo de finura de las arenas, el valor de la constante B varía de 0,39 a 0,41.

Esto significa que la variación de la misma no es de magnitud cuando se emplean áridos finos cuya granulometría va desde arena fina hasta aquéllas correctamente graduadas. Asimismo se ha determinado la función hiperbólica para piedra partida cuarcítica y una mezcla correctamente graduada de árido fino.

Considerando la poca variación obtenida para la constante B, se presenta en el gráfico 4 una curva general de relación de resistencia cilíndrica a compresión a la edad de 28 horas 30 minutos con curado acelerado y la resistencia cilíndrica a compresión a 28 días con curado normal. En la misma se ha introducido

GRAFICO 3

RELACION ENTRE RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A 28 DIAS
CON CURADO NORMAL - RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A
28,5 HORAS CON CURADO ACELERADO

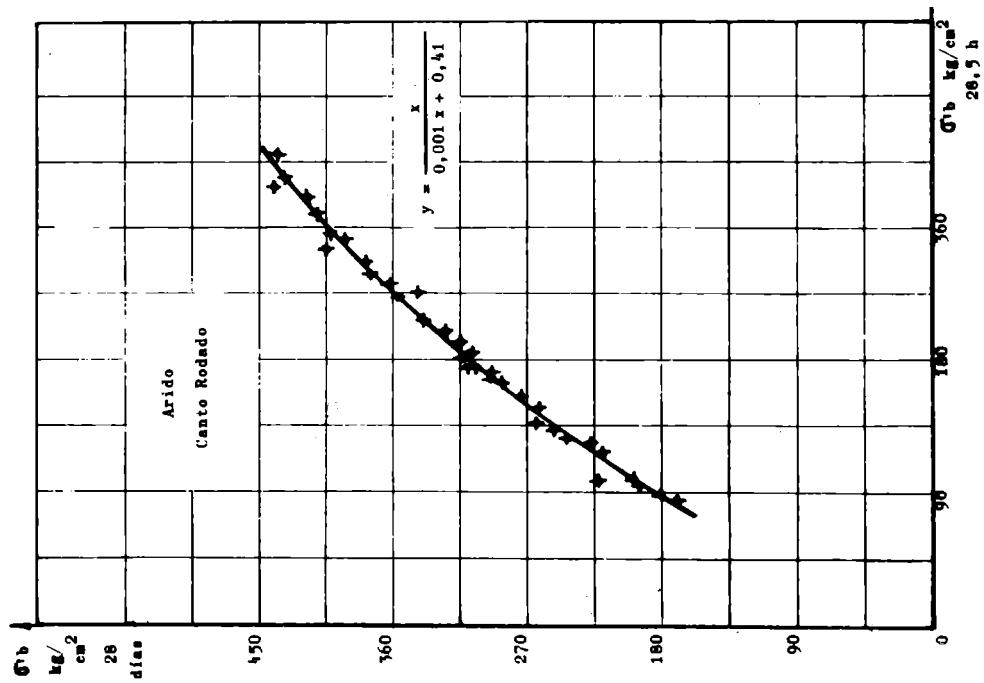
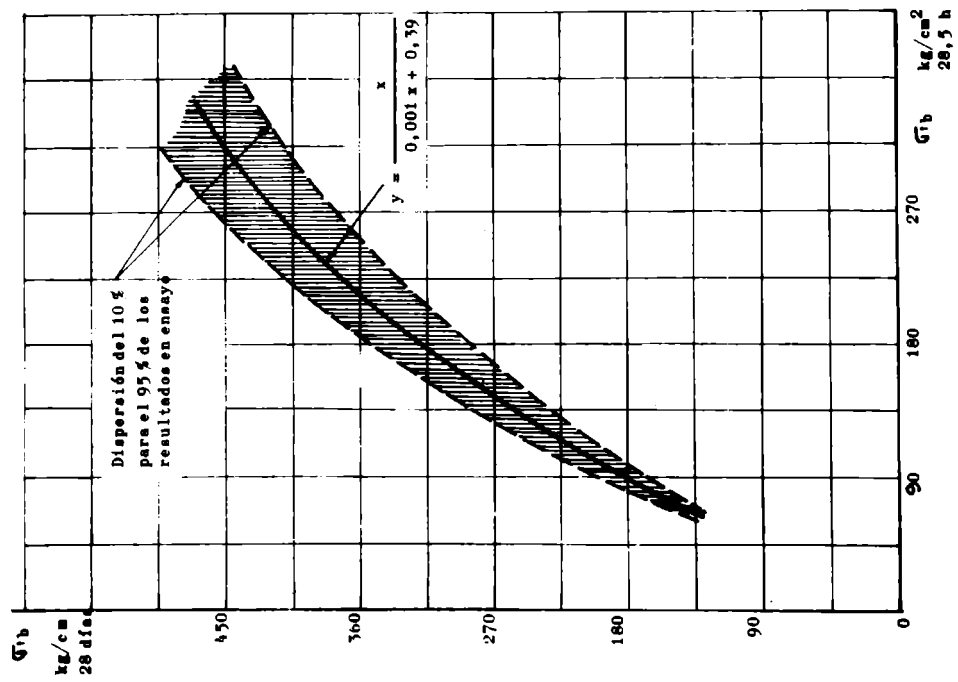


GRAFICO 4

RELACION ENTRE RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A 28 DIAS
CON CURADO NORMAL - RESISTENCIA CILINDRICA A COMPRESION A
28,5 HORAS CON CURADO ACELERADO



la totalidad de los resultados obtenidos en los ensayos realizados. La función hiperbólica resulta en este caso:

$$Y = \frac{X}{0,001 X + 0,39}$$

con una dispersión del 10 por ciento.

CONCLUSION

En el LEMIT se ha comenzado a trabajar rutinariamente con la función obtenida, lográndose en la mayoría de los casos estudiados valores compatibles.

En algunos casos especiales los valores pronosticados fueron considerablemente diferentes a las resistencias obtenidas a la edad de 28 días. Se considera que en estos casos las características físico-químicas del cemento utilizado, fueron el factor decisivo en la falta de cumplimiento del valor pronosticado con la función hiperbólica.

No debe olvidarse que en las experiencias se ha utilizado un solo cemento, que si bien verifica la norma IRAM 1503 presenta características propias. No obstante, el trabajo que se ha realizado da la posibilidad de utilizar la fórmula hallada, en dosificaciones donde intervienen otros cementos y finalmente poder obtener una función hiperbólica en la cual el valor de la constante B esté determinado en primera instancia por la similitud en la composición potencial de los cementos utilizados.

Es por lo tanto de importancia que en obras de medio o gran volumen se confeccionen curvas de relación, en las cuales se utilicen no sólo los áridos sino también el cemento que se empleará en la misma. La curva obtenida deberá ser verificada cada vez que las características del cemento varíen.

Con este estudio se considera que los pronósticos de resis-

tencia efectuados por este método podrán ser de gran utilidad, siendo los valores pronosticados muy próximos a los valores reales obtenidos a la edad de 28 días bajo condiciones de curado normal.

En la actualidad el LEMIT está trabajando con cementos normales de distinta composición potencial, como así también con otros tipos de cementos.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

1. American Society for Testing and Materials (ASTM). Método C-684-73 T variante B. Annual Book of ASTM Standards part 10.
2. Malhotra, V. M., Zoldners, N. G. y Lapinas, R. - Ensayo acelerado para determinar la resistencia del concreto a 28 días. Traducción Revista IMCYC, Mexico, setiembre-octubre 1968 del informe R-134, Canadá Dpto. of Mines and Techn. Surveys (Mines Branch) Ottawa, Canadá.
3. Castiarena, A. N. - Pronóstico de la resistencia del hormigón a la rotura por compresión a 28 días, en base al procedimiento de ensayo ASTM C-684-73 T, Método B.
4. Burgoa, G. R. y Bunge, H. J. - Pronóstico de la resistencia del hormigón a los 28 días por medio del ensayo normal a los 7 días. IV Simposio sobre aglomerantes hidráulicos, hormigones, agregados y sus aplicaciones, LEMIT 1972.
5. Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CINEH-INTI, 1964).

Agradecimientos.

Los autores expresan su agradecimiento a todo el personal de la Sección Hormigones y Agregados del LEMIT, por haber participado en la ejecución de las experiencias realizadas y en especial al Ing. Daniel Violini.