

Predicción de la resistencia potencial del hormigón

Pág 17-34

Carlos Videla C.

Profesor. Departamento de Ingeniería de Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Santiago, Chile.

Oscar Parada S.

Jefe de Ventas Industrial y Comercial de Productos Químicos S.A., ADICRET S.A. Miraflores 590, Santiago, Chile.

RESUMEN: la temperatura de curado afecta significativamente el grado de resistencia que puede alcanzar el hormigón. El efecto combinado del tiempo y la temperatura de origen al término "madurez del hormigón". Basado en esta teoría, A.S.T.M. proporciona un método para estimar la resistencia potencial de un hormigón; el inconveniente de este método es que sólo es aplicable a hormigones idénticos al que se usó para determinar los parámetros que intervienen en dicho procedimiento. Por lo tanto, si bien es cierto el término madurez tiene gran valor desde el punto de vista conceptual, no proporciona un método práctico para determinar la resistencia potencial de un hormigón puesto en obra y surge la necesidad de proporcionar un método más adecuado para este fin. En este trabajo se describe una investigación experimental que desarrolla una metodología-para relacionar la evolución de resistencia lograda en obra (con un perfil de temperaturas reales), con la resistencia determinada en laboratorio (con condiciones de temperatura controlada); se originan así los coeficientes de madurez que permiten hacer una equivalencia, desde el punto de vista de evolución de resistencia para un mismo período de tiempo transcurrido a temperaturas diferentes y proporciona una valiosa información en procesos en que se requiere estimar con exactitud la resistencia alcanzada en obra, en un período de tiempo dado. El programa experimental permitió determinar los coeficientes de madurez y comprobar que estos son poco sensibles, el perfil de temperatura utilizado. Además, se determinó que existe una relación inversa entre la razón agua/cemento y los valores de los coeficientes de madurez. Finalmente, se comprobó que los coeficientes de madurez son altamente sensibles al tipo de cemento por lo cual se requiere determinarlos para cada tipo de cemento.

I. INTRODUCCION

1.1 Consideraciones teóricas

Debido a que la temperatura de curado afecta significativamente el grado de resistencia alcanzado por el hormigón, se ha intentado relacionar el efecto combinado del tiempo y la temperatura a los cuales el hormigón desarrolla su resistencia. Este efecto combinado da origen al término madurez (M), definido por :

$$M = \int (T - T_0) dt \quad [1]$$

donde T : Temperatura del hormigón en un período de tiempo dado "dt".

T_0 : Temperatura de referencia, entendiéndose como tal la temperatura a la cual la resistencia del hormigón permanece constante. Se han propuesto diversos valores para T_0 , sin embargo se acepta como recomendable tomar un valor entre $-12\text{ }^\circ\text{C}$ y $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (1).

A partir del concepto de madurez antes definido, la ecuación normalmente sugerida para predecir la resistencia potencial $R(M)$ de un hormigón para una madurez dada, queda definida por medio de la siguiente relación:

$$R(M) = A + B \text{Log } M \quad (2)$$

Si el curado del hormigón se hace a una temperatura constante, la ecuación toma la forma:

$$R(t) = A + B \text{Log } (T - T_0) + B \log t \quad (3)$$

donde A , B , corresponden a constantes que se deben determinar para cada hormigón específico, ya que depende del grado de resistencia del hormigón (1). Se debe tener en cuenta que estas constantes dependen de una diversidad de factores, entre los cuales se pueden mencionar, como los más relevantes, los siguientes: el tipo de cemento, la razón agua/cemento y la relación cemento / áridos.

Con respecto a las ecuaciones [2] y [3] existen dudas si siguen siendo válidas para un amplio rango de temperaturas de curado, incluso para un mismo hormigón, o si permanecen constantes dichas relaciones para distintos tipos o cantidades de cemento.

Lo anteriormente indicado implicaría que, en rigor, las relaciones determinadas para una dosificación dada solo permitirían estimar la resistencia de otro hormigón igual al anterior al que se le conoce su madurez, cuando la temperatura inicial del hormigón está entre $16\text{ }^\circ\text{C}$ y $27\text{ }^\circ\text{C}$ y no se produce pérdida de humedad durante el período considerado (1). Basado en esta teoría A.S.T.M. proporciona un método para estimar la resistencia potencial de un hormigón $R(t)$, a una edad posterior o intermedia de ensayo por medio de la siguiente ecuación:

$$R(t) = R(t_0) + B[\text{Log } M(t) - \text{Log } m(t_0)] \quad (4)$$

donde:

- | | | |
|----------|---|--|
| $R(t)$ | : | Resistencia potencial del hormigón al tiempo t . |
| $M(t)$ | : | Madurez del hormigón al tiempo t (en $^\circ\text{C} \times \text{h}$). |
| $m(t_0)$ | : | Madurez del hormigón al tiempo t_0 (en $^\circ\text{C} \times \text{h}$). |
| $R(t_0)$ | : | Resistencia potencial del hormigón al tiempo t_0 . |

Para determinar el valor de la constante "B" se deben ensayar probetas a 24 hrs. 3, 7, 14 y 28 días y a las cuales se les calcula su madurez en ($^{\circ}\text{C} \times \text{h}$). Con estos resultados se grafica en papel semilogarítmico la curva resistencia v/s madurez; la pendiente de la recta resultante corresponde al valor de la constante "B" (Figura N° 1). De tal forma que, calculando "B" y teniendo los valores de $R(t_0)$ y $m(t_0)$ para un tiempo dado (el que puede corresponder a 24 hrs.), queda determinada la ecuación $R(t)$ para ese hormigón.

Por lo antes señalado cabe destacar que si bien es cierto el término "madurez" tiene gran valor desde el punto de vista conceptual, no proporciona un método práctico para determinar la resistencia potencial de un hormigón puesto en obra y surge la necesidad de disponer de un método más adecuado para este fin. Normalmente en todo proceso en el cual exista la necesidad de estimar la resistencia potencial de un hormigón, se dispone de la curva de evolución de resistencia en función del tiempo por medio de ensayos realizados en laboratorio de probetas curadas en condiciones normalizadas (es decir, a una temperatura de 20°C y una humedad relativa superior al 95%). Naturalmente estas condiciones no se dan en el hormigón colocado en obra, y su resistencia medida en probetas no corresponde a la alcanzada en obra para igual periodo. De este hecho surge la idea de desarrollar un método que permita relacionar la evolución de resistencia lograda en obra, con la curva de evolución de resistencia determinada en laboratorio, originándose así los "coeficientes de madurez" que permiten hacer una equivalencia para un mismo período de tiempo, pero transcurrido a dos temperaturas diferentes.

Básicamente el procedimiento consiste en determinar el período de tiempo equivalente (t_e), bajo condiciones de curado normalizadas, que es necesario reemplazar en la curva de evolución de resistencia de referencia o normalizada (ecuación 3), para estimar la resistencia del hormigón bajo condiciones de curado en obra. Recordando la definición de madurez (ecuación 1) y aplicando el principio de que a igual madurez se obtiene igual resistencia, se puede demostrar que :

$$t_e = \sum_{i=1}^n \frac{(T_i - T_0)}{(T_c - T_0)} t_i = \sum_{i=1}^n C_{Ti} t_i \quad (5)$$

en que :

T_i : Temperatura del hormigón en el intervalo de tiempo t_i considerado.

T_c : Temperatura normalizada o de referencia; a la cual se desea hacer la equivalencia de tiempo en cuanto a la evolución de resistencia.

t_i : Intervalo de tiempo considerado.

C_{Ti} : Coeficiente de madurez para la temperatura T_i .

Sadgrove postula que el factor de conversión (C_{Ti}) es de la forma:

$$C_s = \frac{T_i + a(^{\circ}\text{C})^2}{T_c + a(^{\circ}\text{C})} \quad (6)$$

donde : C_s : Coeficiente de conversión de Sadgrove.

$a(^{\circ}\text{C})$: Es una constante

En cuanto a la validez de estos coeficientes surgen las siguientes interrogaciones:

- ¿Dependen del tipo de cemento?
- ¿Dependen de la razón agua/cemento?
- ¿Dependen del perfil de temperatura usado?

Con el fin de responder a estas interrogantes se ejecutó el programa experimental que se detalla en las secciones siguientes.

II. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Considerando que la resistencia es principalmente función de la razón agua/cemento y del tipo de cemento, se decidió utilizar dos razones normalmente usadas, (0.5 y 0.6), y dos tipos de cemento, Polpaico Especial y Melón Especial, dando origen a cuatro series de hormigones, que se identificaron por la siguiente nomenclatura:

P5: Polpaico, razón agua/cemento 0.5

P6: Polpaico, razón agua/cemento 0.6

M5: Melón, razón agua/cemento 0.5

M6: Melón, razón agua/cemento 0.6

Si posteriormente se determinara que los coeficientes de madurez son muy sensibles a la razón agua/cemento, esta se debería hacer variar en un rango más amplio.

Se utilizó como temperatura de control, la temperatura de cámara de curado normal (20°C), y se ensayaron a las edades de 1,3, 7, 14 y 28 días, probetas de cada serie para obtener la curva de evolución de la resistencia en función del tiempo.

Estos resultados dieron origen a las curvas de referencia para evaluar los términos $t(R_i)$, de los sistemas de ecuaciones para cada serie, en que $t(R_i)$ es el tiempo requerido para que en la curva de referencia se alcance el valor de resistencia R_i obtenido del ensayo de probetas curadas en condiciones distintas a las normalizadas. Cada una de las series indicadas se sometió a 2 ciclos de curado y se ensayaron 2 probetas diarias, por cada ciclo de curado y serie de hormigón, durante 6 días. Un primer ciclo consistió en curar y ensayar probetas siguiendo el perfil de temperatura indicado en la Figura N°2. En este caso la muestra ensayada el día i estuvo un día curada a temperatura T_i , 1 día a temperatura $T_{(i-1)}$, etc. Por lo tanto, el día de inicio de curado se colocaron en la cámara de curado acelerado 12 probetas por serie, para ensayar 2 probetas en cada día.

En el segundo ciclo de curado se ensayaron las probetas luego de seguir el perfil de temperaturas indicado en la Figura N°3 sea, las probetas ensayadas el día n fueron sometidas a una temperatura T_n durante 1 día. En este caso, el día $(n-1)$ se trasladaron 2 probetas desde la cámara de curado normal a la cámara de curado acelerado.

Las probetas se ensayarán luego de seguir cada uno de los ciclos antes indicados, para ver si los coeficientes de madurez son sensibles al tipo de perfil de temperaturas usado en el ciclo de curado. El primer ciclo de curado dió origen a un sistema de ecuaciones, para determinar los coeficientes C_{Ti} , del siguiente tipo:

$$t(R_n) = \sum_{i=1}^n C_{Ti} \quad \text{para } n= 1, 2, \dots, 6. \quad (7)$$

Del segundo ciclo se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones para determinar los coeficientes C_{Ti} :

$$t(R_n) = (n-1) + C_{Tn} \quad \text{para } n= 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

Los valores calculados para los coeficientes de madurez (C_{Ti}), de estos sistemas de ecuaciones, se entregan en la sección 3.3.

III. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos

En la Tabla N° 1 se entregan los resultados de los ensayos de las probetas curadas en cámara húmeda (a 20°C y humedad relativa superior a 95%). Además, en la Tabla N° 2 se presentan los resultados de los ensayos de aquellas probetas sometidas a cada uno de los ciclos térmicos descritos en la sección 2.

TABLA N° 1 RESULTADOS DE LAS PROBETAS CURADAS EN CONDICIONES NORMALIZADAS

RESISTENCIA CUBICA MEDIA (Kgf/cm ²)				
Edad (Días)	P5	P6	M5	M6
1	106	71	202	87
3	179	125	298	171
7	272	172	317	218
14	329	234	400	259
28	412	(*)	470	309

TABLA N° 2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA CICLO TERMICO
DISTINTO AL NORMALIZADO

Serie	Ciclo de curado en días											Resistencia a compresión Kgf/cm ²
	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°	65°	70°	75°	
P5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	94
P5	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	200
P5	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	176
P5	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	294
P5	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	218
P5	3	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	279
P5	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	270
P5	4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	263
P5	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	281
P5	5	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	319
P5	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	361
<hr/>												
P6	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67
P6	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	122
P6	-	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	124
P6	3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	150
P6	-	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	161
P6	4	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	218
P6	-	1	2	2	2	-	-	-	-	-	-	234
P6	6	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	218
P6	-	1	2	-	2	1	-	-	-	-	-	254
P6	7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	226
P6	-	1	2	1	2	1	-	-	-	-	-	289
<hr/>												
M5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200
M5	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	280
M5	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	298
M5	2	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	343
M5	-	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	365
M5	3	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	393
M5	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-	-	404
M5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	373
M5	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-	-	415
M5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	370
<hr/>												
M6	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	114
M6	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	126
M6	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	146
M6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	190
M6	3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	117
M6	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	134
M6	4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	251
M6	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	289

3.2 Curvas de referencia de evolución de resistencia

Con los resultados experimentales, anteriormente indicados, se determinaron las curvas de endurecimiento en función del tiempo, para cada uno de los hormigones curados en condiciones normales (20°C y más de 95% de humedad). Los resultados de cada serie se ajustaron a dos tipos de curvas; la primera de ellas corresponde a la curva propuesta por Hummel (Ref. 4.).

$$R(t) = A + B \log t$$

[9]

y una segunda curva de correlación del tipo :

$$R(t) = A + B (\log t)^c \quad (10)$$

Esta última relación, propuesta por los autores, ajusta con mayor exactitud a los resultados experimentales de esta investigación. En las Tablas N° 3 y 4 se entrega el valor de las constantes para cada una de las curvas analizadas y para cada serie de hormigones. Además, se indica el coeficiente de correlación (r) para cada serie.

Finalmente, en la Tabla N° 5 se entrega una comparación de los valores de resistencia calculados según cada una de las expresiones antes indicadas, con respecto a los resultados promedio de ensayo. La representación gráfica de cada una de estas curvas se muestran en las Figuras 5, 6 y 7.

TABLA N 3 FORMULA DE HUMMEL : $R(t) = A + B \log t$

Nomenclatura Serie	A	B	Coeficiente de Correlación
P5	93.57	212.01	0.995
P6	64.79	138.89	0.989
M5	198.53	177.33	0.983
M6	91.48	149.81	0.998

TABLA N 4 FORMULA DE HUMMEL : $R(t) = A + B (\log t)^c$

Nomenclatura Serie	A	B	C	Coeficiente de Correlación
P5	106.00	192.84	1.27822	0.999
P6	71.00	132.27	1.23936	0.998
M5	202.00	170.82	0.92958	0.984

M6	87.00	156.17	0.86393	0.999
----	-------	--------	---------	-------

TABLA N 5 COMPARACION DE ESTIMACIONES

Edad Resist. cúbica Hormigón (días) (Kgf/cm ²)	Resist. calculada Promed. ensayo (Kgf/cm ²)	Resist. calculada según form. Hummel (Kgf/cm ²)	según form. prop.
Serie P5			
1	106	94	106
3	179	195	181
7	272	273	262
14	329	337	336
28	400	412	415
Serie P6			
1	71	65	71
3	125	131	129
7	172	182	178
14	234	224	228
Serie M5			
1	202	199	202
3	298	283	288
7	317	348	348
14	400	402	396
28	470	455	443
Serie M6			
1	87	92	87
3	171	163	170
7	218	218	222
14	259	263	263
28	309	308	302

3.3

Cálculo de coeficiente CT

El cálculo de los coeficientes CT se hizo resolviendo los sistemas de ecuaciones 7 y 8, que se indican en la sección 2. Los sistemas se resolvieron para los valores t(Ri) despejados de la ecuación 9, que corresponden al tiempo requerido para que el valor estimado de la curva de resistencia corresponda al valor potencial

Se pudo apreciar que los resultados obtenidos de los sistemas tipo Ec. 6, son más inexactos que los calculados por medio de los sistemas tipo Ec. 7. Esto se debe a que los primeros involucran en forma simultanea una serie de variables, en que cada una de ellas tienen asociado un error aleatorio de tipo experimental. Por lo tanto, se calcularon los CT correspondientes solo a la serie M5 usando ambos ciclos de temperaturas (ciclo tipo 1 y ciclo

tipo 2), con lo que se verificó que los coeficientes calculados con el ciclo de curado tipo 1 no difieren prácticamente con los determinados por medio del ciclo de curado tipo 2 (ver Figura 8).

Finalmente, en la Tabla N° 6 se indica la curva de correlación que define a los coeficientes de madurez así como también el valor de las constantes que en ella figuran para cada serie.

En las Figuras 9 a 10 se muestran en forma gráfica los valores calculados de los coeficientes de madurez para cada una de las series antes señaladas y para el ciclo térmico 2. Además en las Figuras 9 y 10 se superponen las curvas correspondientes a las dos razones agua/cemento usadas en este trabajo (0,5 y 0,6), para cada tipo de cemento, para permitir interpolar en forma más fácil entre estas dos razones. Igualmente, en las Figuras 11 y 12 se comparan los coeficientes de madurez determinados para cada tipo de cemento utilizado, manteniendo constante la razón agua/cemento.

Nomenclatura Serie	Ciclo Térmico Tipo	A	Constantes B	C
Serie P5	2	-0.238000	0.162990	7.705061
Serie P6	2	0.287199	0.067447	8.959932
Serie M5	2	0.032216	0.195951	6.069189

Serie M5	1	0.032216	0.195951	5.989804
Serie M6	2	0.019959	0.214432	5.774553

TABLA N 6 CURVA DE CORRELACION PARA CALCULAR C_T

$$C_T = A + B (\log T)^c$$

IV. CONCLUSIONES

a) Curvas de Referencia de Evolución de Resistencia

De las Figuras 4, 5, 6, 7 y Tabla N° 5, se pueden apreciar que el tipo de curva de predicción de resistencia del hormigón propuesta ajusta con mejor aproximación que la curva tipo Hummel. Esto indicaría que, para el caso de necesitar una predicción más exacta de la resistencia utilizar una curva de predicción del tipo:

$$R(t) = A + B (\log t)^c$$

b) Coeficientes de Madurez

Con respecto a las interrogantes planteadas en este trabajo sobre las características de coeficiente de madurez.

Los coeficientes C_T prácticamente no varían al modificar el perfil de temperaturas del ciclo de curado. Esto es altamente positivo, puesto que de no ser así, cada ciclo de curado tendría sus propios coeficientes C_T , lo que haría que estos tuvieran valor sólo desde el punto de vista teórico y no de aplicaciones prácticas, (ver Figura 8).

Se puede apreciar de las Figuras 9 y 10, que para variaciones de la razón agua/cemento entre 0.5 y 0.6, que permitieron confeccionar hormigones con asentamiento de cono entre 1 y 12 centímetros, rango que incluye la gran mayoría de los hormigones que se usan comúnmente, la variación de los coeficientes C_T es muy pequeña para ambos tipos de cementos. Esto permitiría obtener por interpolación en los gráficos, los valores de C_T para cualquier hormigón con razón w/c que varié entre 0.5 y 0.6.

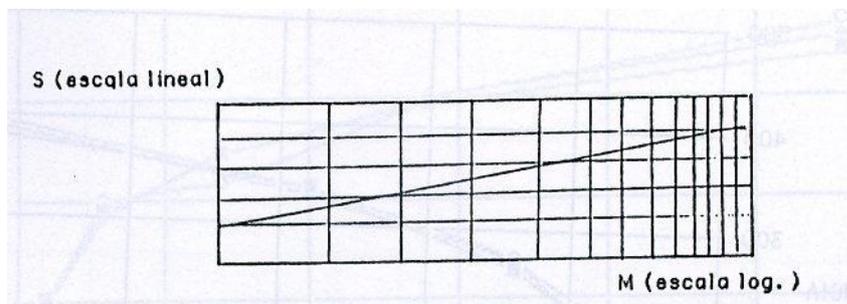
Es interesante destacar que, para ambos tipos de cemento, los coeficientes CT correspondientes a la mayor razón W/C son menores. Es decir existe una relación inversa entre la razón W/C y los valores de coeficientes CT. (ver Figuras 9 y 10)

Finalmente, es importante destacar la gran variación que presentan los coeficientes para los dos tipos de cementos. Las Figuras 11 y 12 muestran que, para ambas razones w/c, los valores de los coeficientes CT correspondientes al cemento Polpaico Especial son del orden del doble de los correspondientes para el cemento Melón Especial. Esto indicaría que los valores de los coeficientes CT tienen una relación inversa con la velocidad de evolución de la resistencia en los primeros días de vida del hormigón, puesto que como se puede apreciar en las Figuras 4 a 7, la velocidad de evolución de la resistencia en los primeros días es mayor en el cemento Melón Especial.

REFERENCIAS

1. Neville, A. M., "Tecnología del Concreto Tomo I", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., México, 1977.
2. ASTM : C 918-80, "Developing early age compression test values and projecting later age strengths", American Society for Testing and Materials, Part 14. USA., 1980.
3. Sadgrove, CECA, "Apuntes curso Advanced Concrete Technology", Cement and Concrete Association, Conference and Training Centre, Inglaterra, 1984
4. Hummel, A. Prontuario del Hormigón. Editores Técnicos Asociados, S. A., Madrid, 1966.

Figura 1 Curva de resistencia versus madurez



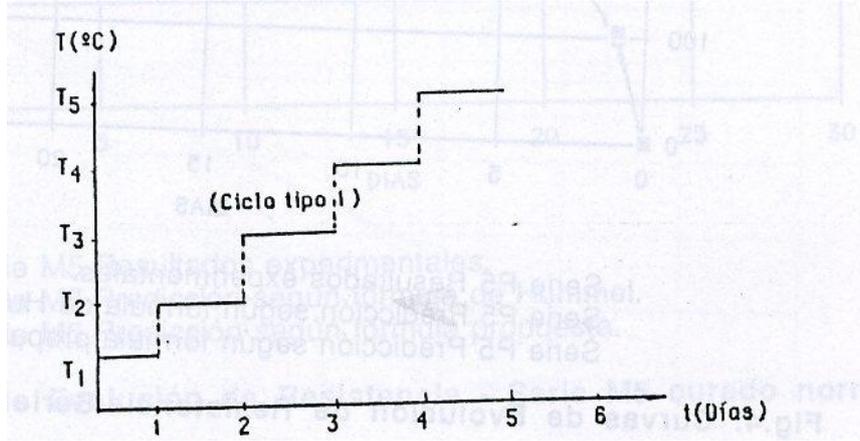


Figura 2 Ciclo de curado tipo 1

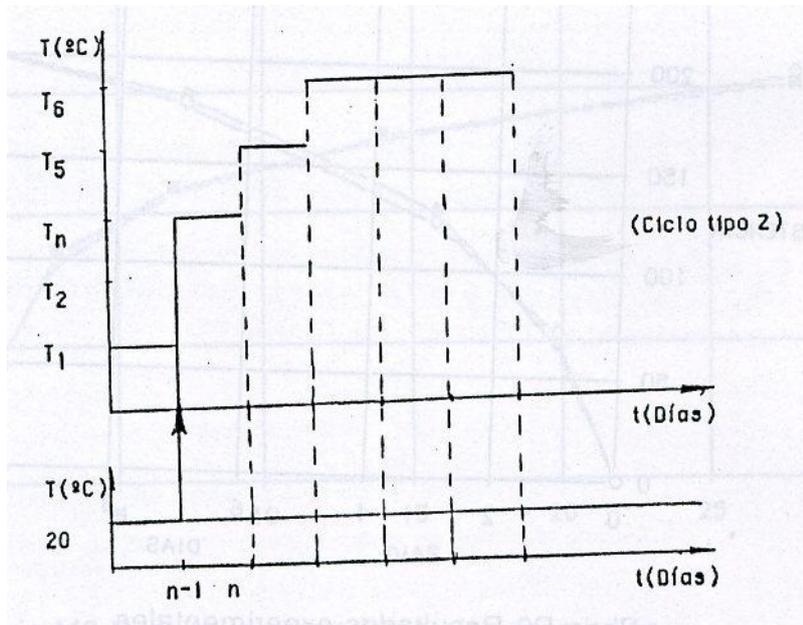
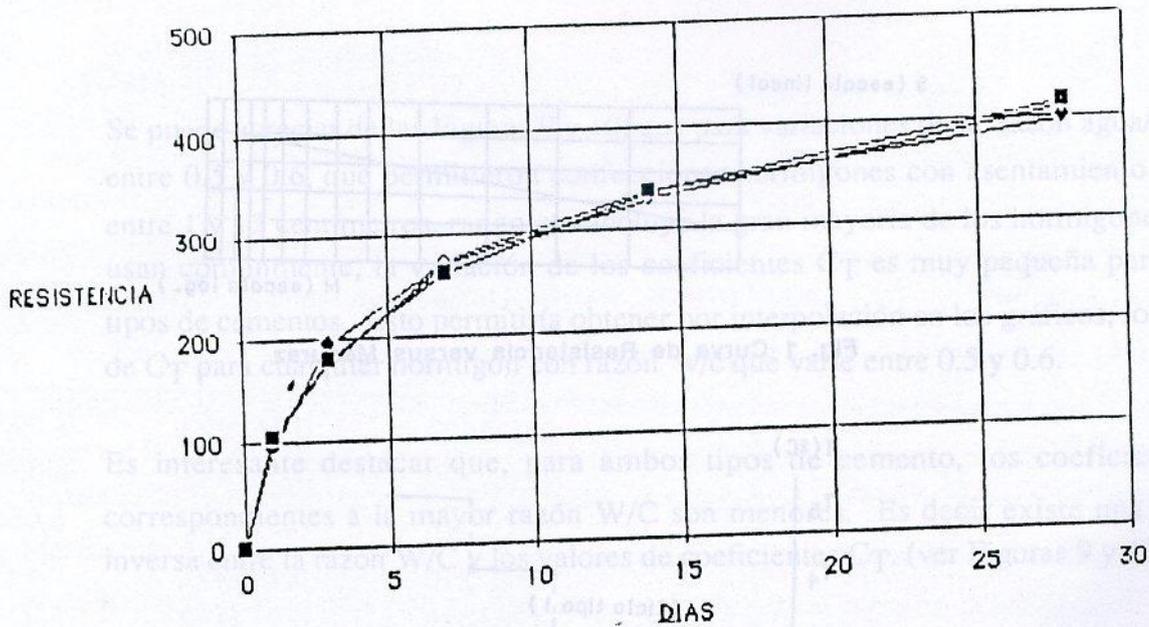
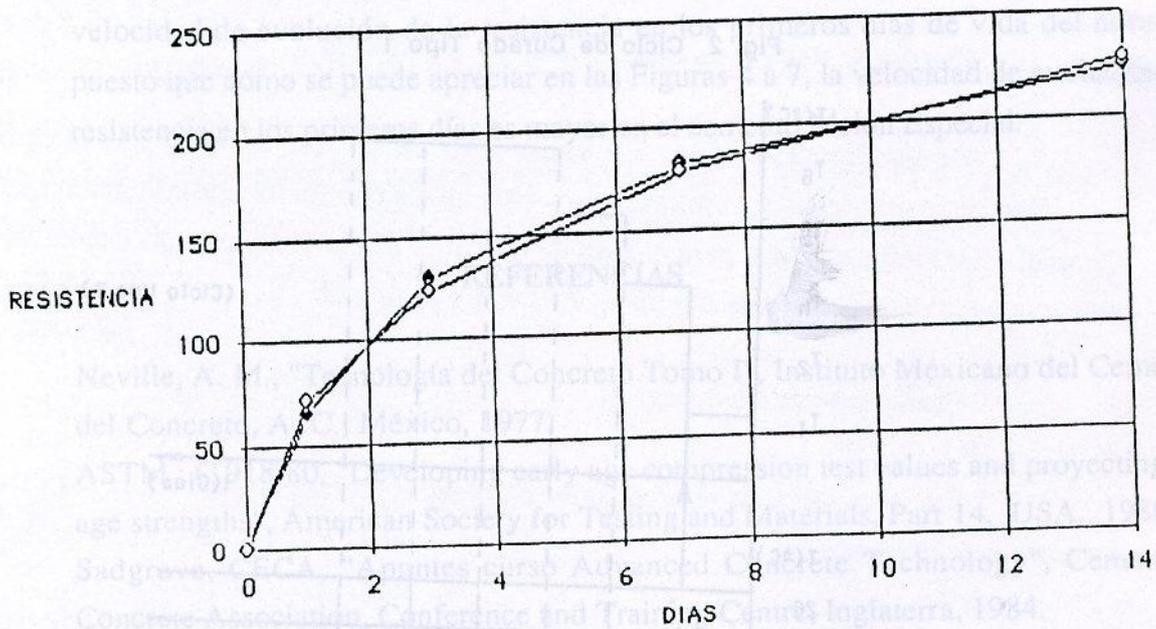


Figura 3 Ciclo de curado tipo 2



Serie P5 Resultados experimentales.
 Serie P5 Predicción según fórmula de Hummel.
 Serie P5 Predicción según fórmula propuesta.

Figura 4 Curvas de evolución de resistencia-serie P5 curado normal



Serie P6 Resultados experimentales.
 Serie P6 Predicción según fórmula de Hummel.
 Serie P6 Predicción según fórmula propuesta.

Figura 5 Curvas de evolución de resistencia – serie P6 curado normal

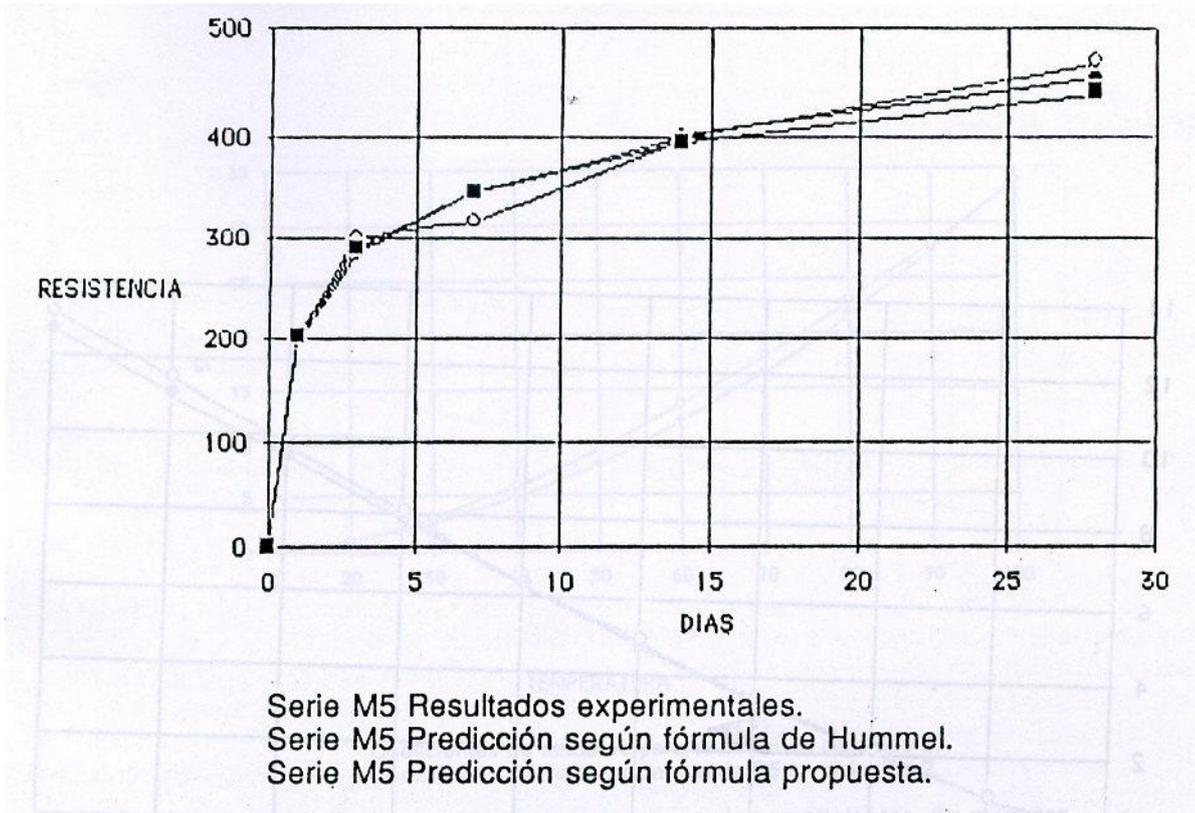


Figura 6 Curvas de Evolución de resistencia – serie P5 curado normal

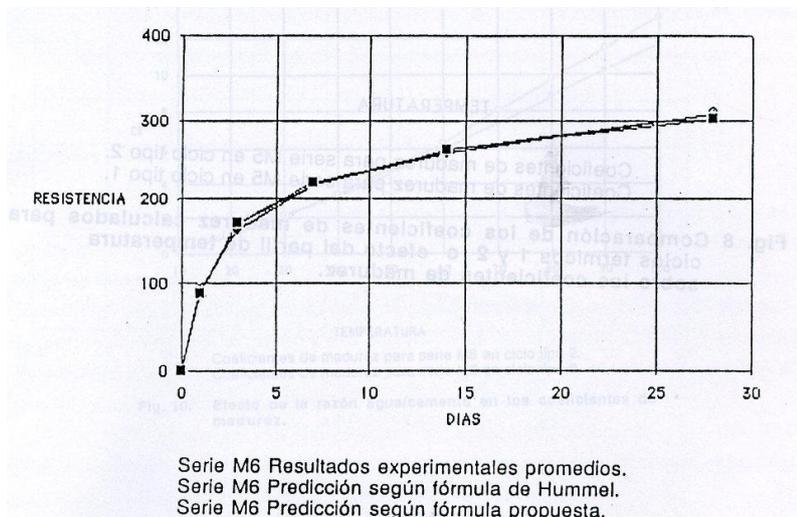


Figura 7 Curvas de Evolución de resistencia – serie M6 curado normal

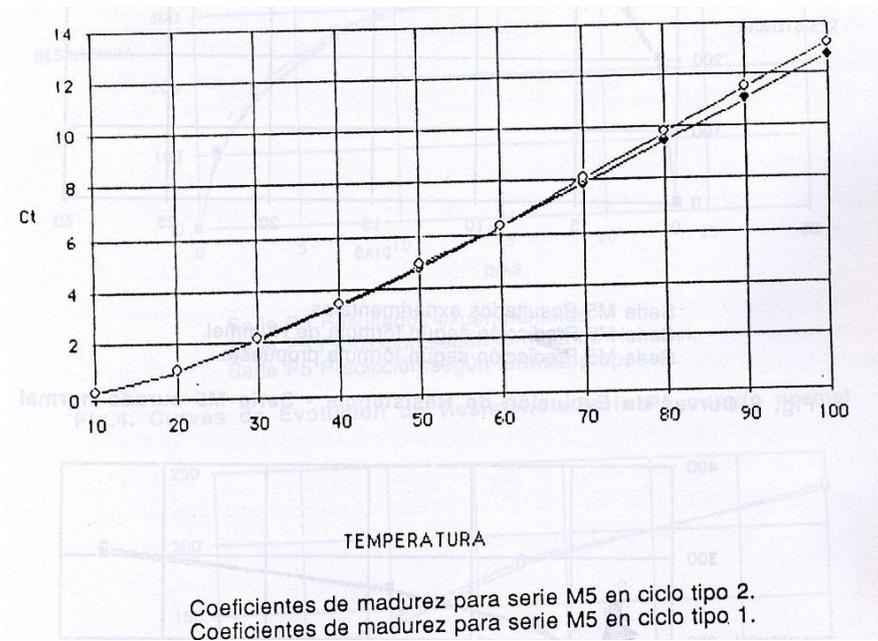


Figura 8 Comparación de los coeficientes de madurez calculados para ciclos térmicos 1 y 2 o efecto del perfil de temperatura sobre los coeficientes de madurez

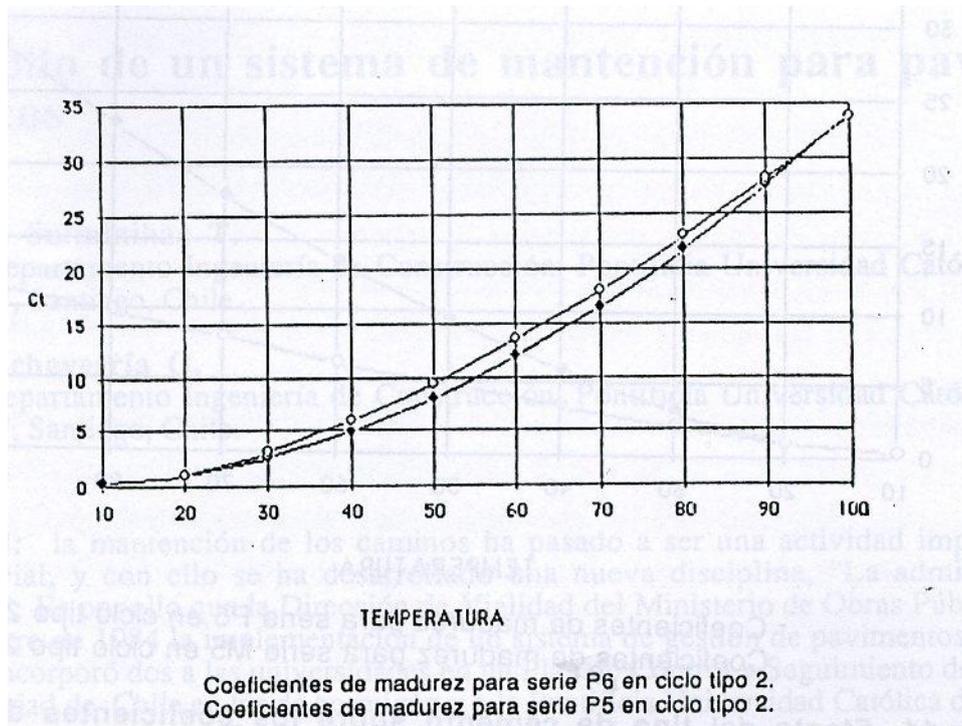


Figura 9 Efecto de la razón agua/cemento en los coeficientes de madurez

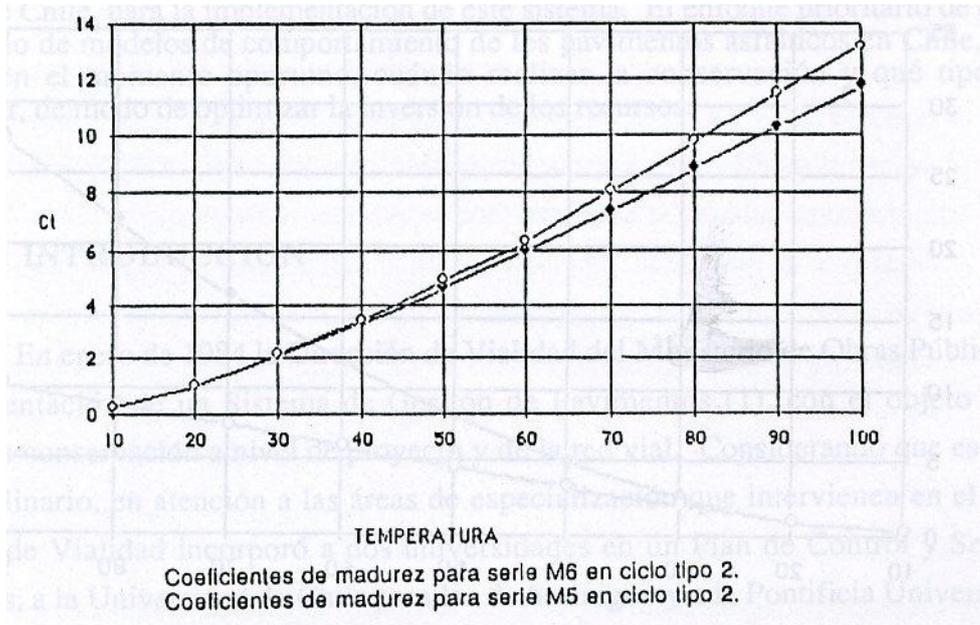


Figura 10 Efecto de la razón agua/cemento en los coeficientes de madurez

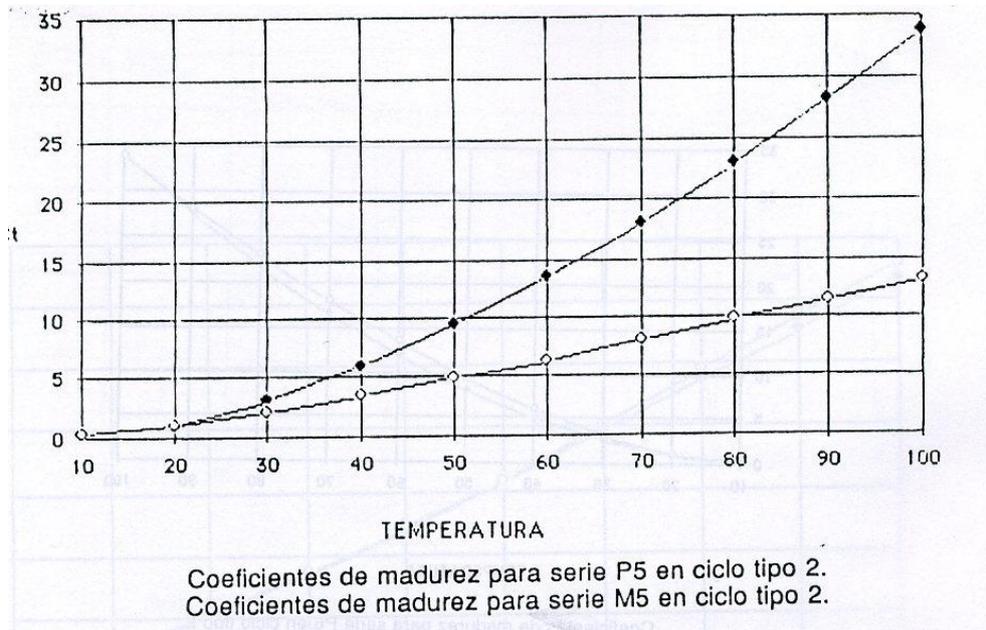


Figura 11 Efecto del tipo de cemento sobre los coeficientes de madurez

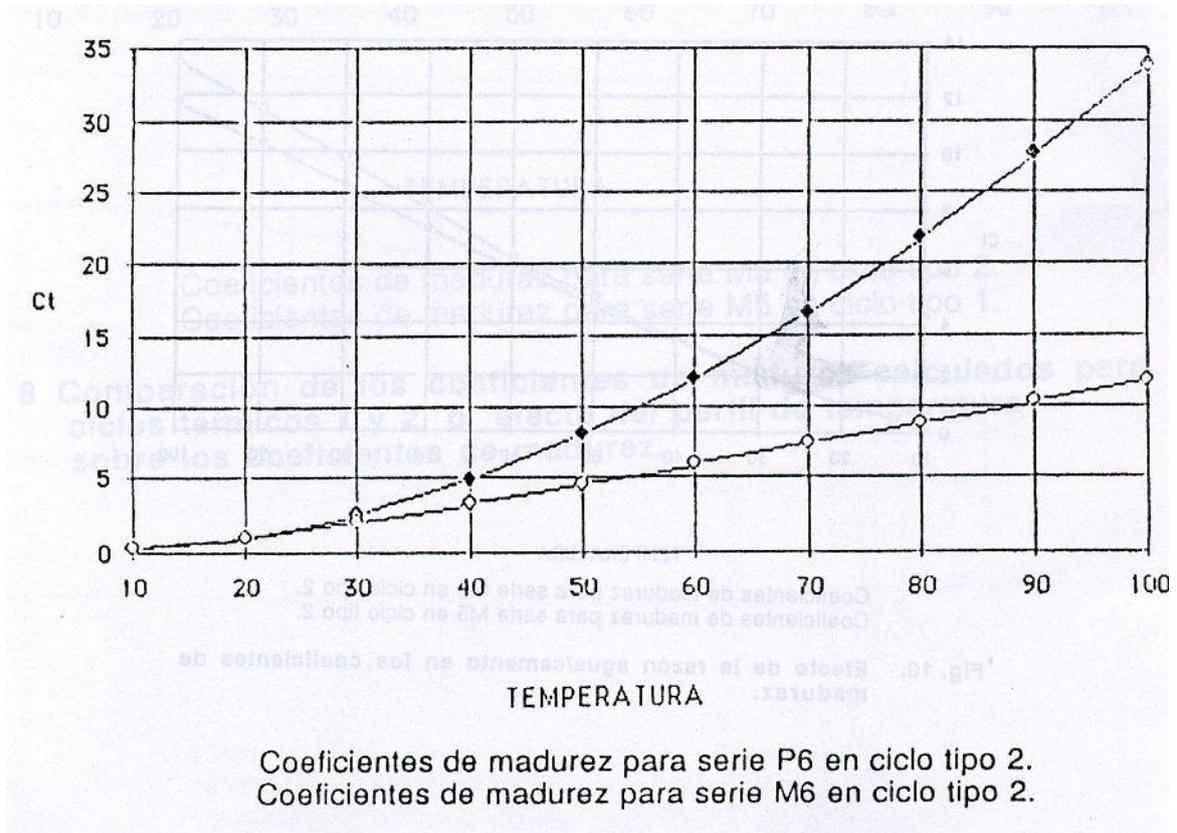


Figura 12 Efecto del tipo de cemento sobre los coeficientes de madurez