

# COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES FABRICADOS CON DISTINTAS CLASES DE CEMENTO ANTE CLIMAS EXTREMOS

Por Carlos Videla C., Juan Pablo Covarrubias T. y José Miguel Pascual D.

Pàg. 19-46:

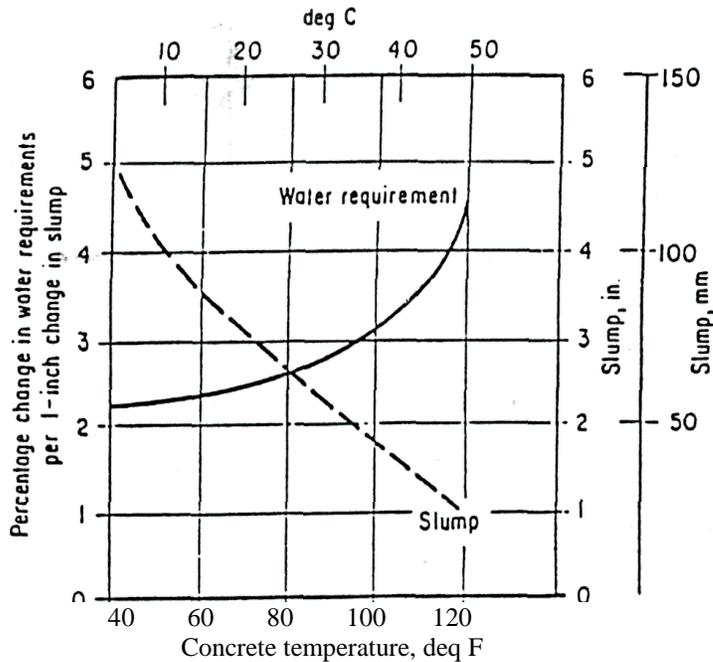
*El objetivo principal de esta investigación fue determinar el comportamiento de diferentes clases de cemento ante climas extremos. Para tal efecto el estudio planteó cuantificar y analizar el efecto del ciclo de curado (temperatura y tiempo), en el desarrollo de la resistencia de hormigones fabricados con distintos cementos. Las clases de cemento consideradas fueron Cemento Portland y Cementos con Adiciones: Portland Puzolánico, Puzolánico y Siderúrgico. El trabajo presenta los procedimientos de confección y tratamiento de las probetas y las curvas de endurecimiento y madurez para diferentes ciclos de curado, considerando temperaturas de curado de 5°C, 20°C y 30°C, con tiempos de aplicación de ellas de 5 horas, 7 y 28 días. Los ensayos de resistencia cúbica a compresión se realizaron a 1, 2, 3, 7, 28 y 90 días de edad, los que se correlacionaron con los valores de madurez calculados en función de los ciclos térmicos aplicados. Se analizan los resultados obtenidos y las tendencias en la evolución del desarrollo de resistencia para las diferentes clases de cemento estudiadas. No se aprecia influyente el efecto de temperatura en las propiedades del hormigón fresco (trabajabilidad). El comportamiento observado para Cementos Portland concuerda en general con los resultados informados en la bibliografía. Sin embargo, existen diferencias de comportamiento bajo condiciones extremas para los Cementos Portland Puzolánico, Puzolánico y Siderúrgico. En el caso de estos últimos cementos, una temperatura de curado mayor entrega una resistencia mayor a igual madurez. Se concluye que para el Cemento Portland el efecto de la temperatura de curado en la resistencia muestra un óptimo a los 20°C. En el caso de los Cementos con Adiciones, los resultados indican que la máxima resistencia se obtiene a mayores temperaturas de curado. También, como era de esperarse, que las curvas de madurez versus resistencia son lineales en un gráfico semi logarítmico y que estas relaciones son específicas de cada hormigón y cemento utilizado.*

## INTRODUCCIÓN

La tecnología del hormigón basa sus pautas generales en temperaturas del hormigón de 20 °C y en cementos tipo Portland puro. Sin embargo, cambios de temperatura del hormigón, con respecto a la de referencia, alteran su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. Se hace así necesario el correcto entendimiento de los fenómenos que se presentan en el hormigón al ser expuesto a temperaturas extremas, sean estas altas o bajas. Por otra parte, el amplio uso de cementos con adiciones en algunos países, requiere el conocimiento del efecto de la temperatura sobre las propiedades de hormigones fabricados con estos cementos. Por lo tanto, este trabajo retiene cuantificar y analizar estos cambios de comportamiento por efectos de la temperatura, de hormigones fabricados con distintas clases de cemento. De esta forma se pretende aportar información que permita tomar decisiones lógicas sobre la forma de actuar en faena, ante hormigonados en climas rigurosos. Esta información es particularmente relevante en el caso de obras de infraestructura (puentes, caminos, etc.), las que a menudo están expuestas a condiciones climáticas adversas.

## ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL HORMIGÓN

El ACI (1985) y la norma chilena NCh 170 (1985) indican requisitos de temperatura para el hormigonado en climas rigurosos, los que según la literatura técnica se explican por los siguientes tres efectos importantes que ésta tiene en el hormigón:



**Fig. 1 - Efecto de temperatura en asentamiento de cono y necesidad de agua del hormigón (ACI 305R-77, Manual of Concrete Practice, Parí 2,1985).**

Carlos Videla C. se recibió de Ingeniero Civil en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Posteriormente, realizó estudios de postgrado en la Universidad de Birmingham en Inglaterra, obteniendo el grado de Doctor of Philosophy. Actualmente se desempeña como Profesor adjunto y Jefe del Laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Ha desarrollado una intensa labor profesional, docente, de investigación y extensión en las áreas de Tecnología de Materiales e Ingeniería Vial. Ha tenido una activa participación en varios proyectos de investigación realizados para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas. Es miembro del Directorio de la Fundación DICTUC, del Instituto Chileno de Carreteras y del Instituto Chileno del Asfalto, director del Centro IPC N°8 - CHILE de Transferencia de Tecnología del Instituto Panamericano de Carreteras y miembro de las comisiones técnicas "Hormigón Fast Track" y "Tecnología del Hormigón" del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón.

Juan Pablo Covarrubias T. es gerente del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. Es profesor de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Obtuvo sus grados de Master of Science y Doctor of Philosophy en Ingeniería Civil en la Universidad de Birmingham en Inglaterra. Director de ACHEPH A.G., AFADIA.C. y Asociación Chilena del Hormigón Prefabricado A.C.. Ha sido jefe del Departamento de Ingeniería de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y jefe del Laboratorio de Resistencia de Materiales Miguel Letelier de DICTUC. Ha dictado los cursos de Materiales de Ingeniería, Tecnología del Hormigón, Construcción de Caminos y Edificación. Ha prestado asesorías a diversas empresas en las áreas de construcción de pavimentos, tecnología del hormigón y reparación de hormigones.

José Miguel Pascual D. es Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Actualmente se desempeña como Jefe de Servicio Exterior del Laboratorio de Resistencia de Materiales RESMAT de DICTUC, donde trabaja desde 1988. Sus principales áreas de interés son: Tecnología del hormigón, inspecciones y peritajes en obras, control de calidad de elementos prefabricados de hormigón, reparación de estructuras de hormigón armado y ensayos especiales.

### Variación de la cantidad de agua de amasado en el hormigón

La Fig. 1 muestra como varía la necesidad de agua por metro cúbico de hormigón y el cono de Abrams obtenido con una dosis constante de agua, para diferentes temperaturas del hormigón. Como se observa de este gráfico, a mayor temperatura mayor es la cantidad de agua necesaria para obtener igual trabajabilidad medida con cono de Abrams. Esto hace variar la razón agua-cemento y por lo tanto la resistencia.

En la Fig. 1 se aprecia que hasta una temperatura del hormigón de 20 °C la curva se podría considerar lineal, y que a 30 °C la tangente a la curva comienza a crecer rápidamente. Este sería el límite máximo de temperatura del hormigón para tiempo caluroso. Lo recomendable sería 20 °C, por problemas de sensibilidad y homogeneidad en la resistencia de los hormigones. Sobre 20 °C las variaciones de necesidad de agua con temperatura aumentan, introduciendo variaciones más importantes en la razón agua-cemento, y por lo tanto en la resistencia.

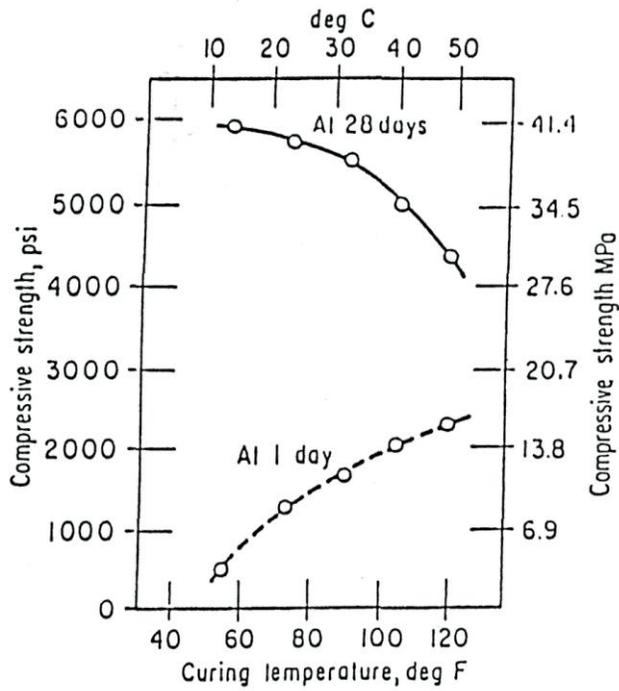
Para temperaturas bajas del hormigón (menores a 10 °C), se observa en la Fig. 1 que la trabajabilidad tiene una alta variación dependiendo de la temperatura. Esto exigiría un muy buen control de la razón agua-cemento para evitar variaciones de resistencia. También se observa que a bajas temperaturas la cantidad de agua necesaria es menor, lo que produce un alza en la resistencia.

Lo comentado anteriormente explicaría, en parte, por qué los hormigones fabricados en invierno tienen en promedio una mayor resistencia que los fabricados en verano

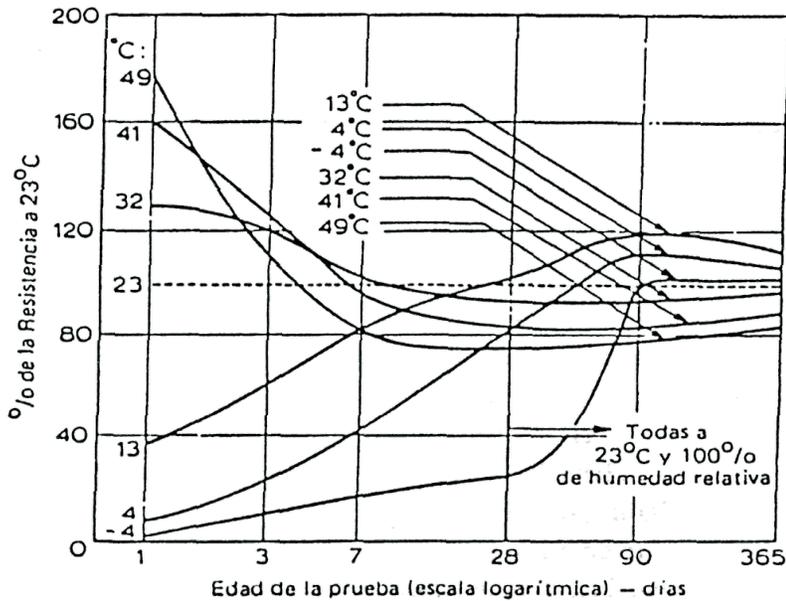
### **Variación de la resistencia con la temperatura de curado**

Las Figuras 2 y 3 muestran el efecto de la temperatura del hormigón en su resistencia a largo plazo (A.C.I., 1985; Neville, 1983; C&CA, 1980; Pink, 1967; Hummel, 1966). La Fig. 2 muestra la resistencia de un hormigón curado durante todo el tiempo a la temperatura de curado indicada. La Fig. 3 presenta el efecto de mantener el hormigón a la temperatura indicada y después de 28 días mantener todos los hormigones a 23 °C. En ambos casos se observa que una mayor temperatura es beneficiosa a temprana edad (mayor madurez), pero perjudicial a 28 días (también mayor madurez).

La explicación de este fenómeno es que un aumento de la temperatura acelera la reacción química de hidratación del cemento y es beneficiosa para la resistencia a temprana edad del hormigón, pero es perjudicial para la resistencia desde aproximadamente 7 días de edad en adelante. Aparentemente esta hidratación más rápida forma productos de peor estructura física, probablemente más porosos, de forma que un gran porcentaje de los poros van a quedar siempre huecos. La regla de la razón gel-espacio indicaría que esto producirá una resistencia menor que una estructura menos porosa (Neville, 1983). Verbech y Helmuth (1968) agregan que la rápida velocidad de hidratación inicial, a mayores temperaturas, retarda la hidratación posterior y produce una distribución no uniforme de los productos de hidratación en la pasta de cemento. Esto a su vez genera puntos de mayor porosidad y por lo tanto de menor resistencia. Este hecho también explicaría el aumento de resistencia en los hormigones fabricados en invierno y limita las temperaturas máximas del hormigón fresco.



**Fig. 2 - Efecto de la temperatura en la resistencia a 1 día y a 28 días (Neville, 1983; ACI 305R-77, Manual of Concrete Practice, Part 2, 1985).**



**Fig. 3 - Efecto de la temperatura durante los primeros 28 días en la resistencia del hormigón (Neville, 1983; ACI 306R-78, Manual of Concrete Practice, Part 2, 1985).**

### Madurez del hormigón

Debido a que la resistencia del hormigón es dependiente de la edad y de la temperatura, se puede decir que la resistencia es función de la sumatoria de los intervalos de tiempo multiplicados por la temperatura del hormigón más 10 °C. Esta sumatoria es la madurez del hormigón. La temperatura se considera con el origen en -10 °C, porque experimentalmente se ha determinado que el hormigón muestra pequeños incrementos de resistencia entre -12 °C y -10 °C. A menores temperaturas no se aprecia un aumento de resistencia. Por otra parte, es importante no exponer al hormigón a estas temperaturas mientras se encuentre saturado de agua, porque el congelamiento del agua lo dañaría, si éste no tiene una resistencia mínima.

La ecuación de madurez a largo plazo es:  $M = X [t \times (T + 10)]$

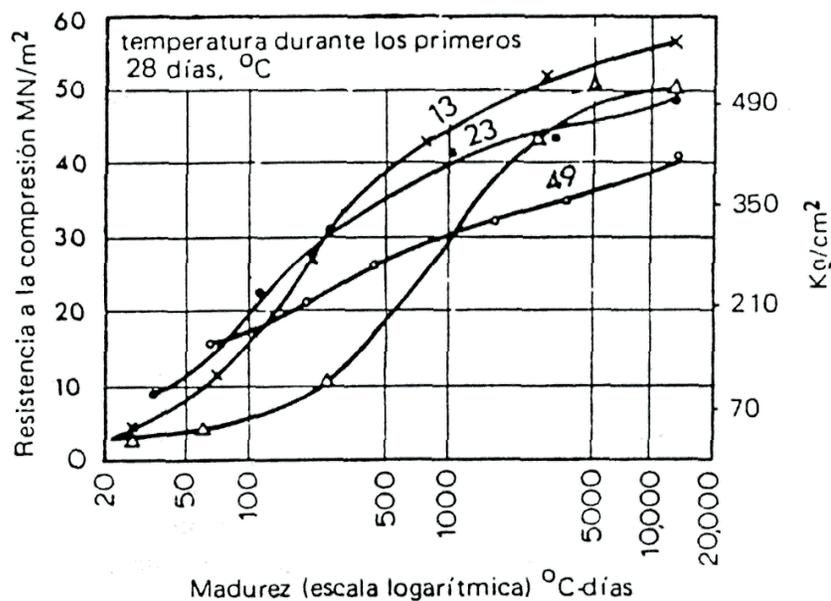
siendo M la madurez del hormigón, T la temperatura del hormigón (°C) y t el tiempo de mantención de la temperatura T.

En general la madurez se asume lineal a largo plazo. A corto plazo la relación no es lineal y existen otras ecuaciones de madurez como la de Sadgrove y Voellmy (C&CA, 1980).

Videla et al. (1988) han demostrado que para ciclos de curado con temperaturas entre 20 y 75°C, el coeficiente de madurez de Sadgrove no varía al modificar el perfil de temperaturas del ciclo de curado, siendo levemente menor a mayor razón W/C, y es fundamentalmente afectado por el tipo de cemento (varia en forma inversa con la velocidad de evolución de la resistencia en los primeros días de vida del hormigón).

En general se supone que hormigones con igual madurez tienen igual resistencia. Sin embargo, a mayor temperatura la resistencia es mayor a corto plazo y menor a largo plazo, aunque la madurez sea igual. Es importante, por lo tanto, establecer la relación resistencia-madurez para cada hormigón específico y ciclo térmico, como se ilustra en la Fig. 4, la que se pueden obtener de:

$$R = A + B \log M$$



**Fig. 4 - Influencia de la temperatura en la madurez del hormigón (Neville, 1983).**

#### PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tomando como antecedente las clasificaciones de tiempo frío y tiempo caluroso que hace la norma chilena (NCh 170, 1985) y considerando las temperaturas extremas a las que normalmente se ejecutan las faenas de construcción, se definió como mínima temperatura del hormigón en frío a "5 °C" y como máxima temperatura en caliente a "30 °C". En base a estas dos temperaturas y a una temperatura de referencia de "20 °C", se procedió a un estudio del efecto que producirían estas variaciones sobre el comportamiento de los hormigones, desde dos puntos de vista:

- Efecto de su magnitud (5 , 20 y 30 °C).
- Efecto del período de exposición o tiempo de curado a dichas temperaturas. En particular se estudiaron tres tiempos de curado: 5 hrs, 7 y 28 días.

#### Efecto de la temperatura en el comportamiento de las clases de cemento

Este proyecto de investigación tuvo por objeto evaluar el comportamiento de hormigones preparados con cuatro clases de cemento. Las clases de cemento empleadas fueron: Cemento Portland, Cemento Portland Puzolánico, Cemento Puzolánico y Cemento Siderúrgico.

La composición característica de estos cementos es según normas chilenas (NCh 148, 1968):

- Cemento Portland: Clinquer y yeso.
- Cemento Portland Puzolánico: Clinquer, hasta un 30% de Puzolana y yeso.
- Cemento Puzolánico: Clinquer, 30% a 50% de Puzolana y yeso.
- Cemento Siderúrgico: Clinquer, 30% a 70% de escoria de alto horno y yeso.

Se analizaron hormigones fabricados con dos razones agua-cemento: 0,45 y 0,60 (excepto para Cemento Puzolánico en que se usó sólo W/C = 0,60) y se midió la resistencia a la compresión a diferentes edades.

Se confeccionó un total de 21 hormigones de prueba, que comprendieron además las siguientes variables de estudio referentes a temperatura y tiempo de curado:

- Frío: - 5 hr a 5 °C, resto del tiempo 20 °C.
- 7 días a 5 °C, resto del tiempo 20 °C.
- 28 días a 5 °C, resto del tiempo 20 °C. •Caliente: - 5 hr a 30 °C, resto del tiempo 20 °C.

- 7 días a 30 °C, resto del tiempo 20 °C.
- 28 días a 30 °C, resto del tiempo 20 °C.
- Normal: - Patrón a 20 °C permanentemente.

Las siguientes variables se mantuvieron fijas:

- a) Humedad de curado. Ello mediante un sistema de doble embolsado de las probetas, el que permitía un aislamiento de la humedad ambiental.
- b) Dosis de agua. Se mantuvo constante la dosis de agua y para lograr distintas razones W/C, se varió la cantidad de cemento.
- c) Granulometría y el tipo de áridos.

#### **Dosificación de hormigones de prueba**

Las dosificaciones de los hormigones estudiados se muestran en la Tabla 1 siguiente:

**TABLA 1 Dosificación de Hormigones.**

W/C	Cemento (kg)	Arena (kg)	Gravilla (kg)	Grava (kg)	Agua (kg)
0,45	400	830	295	720	180
0,60	300	875	310	755	180

#### **Confección de probetas**

A continuación se describe brevemente los procedimientos de confección, curado y ensayo a compresión de las probetas obtenidas a partir de los hormigones de prueba.

##### a) Confección de probetas:

Para hormigones en frío y caliente se fabricaron cachadas de 80 Its; con lo cual se obtuvieron 22 probetas cúbicas de 15 cm. Para hormigones patrón a 20 °C, se procedió a confeccionar cada hormigón en dos cachadas, una de 30 Its y otra de 40 Its. El objetivo de esto fue tener posibilidades de evaluación y análisis estadístico a posteriori. Se utilizó el siguiente procedimiento de confección :

- Los materiales constituyentes del hormigón se guardaron durante tres días previos a la confección, en condiciones de temperatura similares a las de curado inicial del hormigón.
- Se corrigió la dosificación teórica por humedad, absorción y volumen a ocupar.
- Se midió el cono de Abrams.
- Se procedió a embolsar las probetas.
- Las probetas se distribuyeron en la cámara de climatización correspondiente.
- Se desmoldaron las probetas a las 24 hrs.
- Debido a que una de las variables en estudio era el tiempo de curado, se procedió a marcar las probetas de manera diferenciada. Así se lograba distinguir y controlar los tres tiempos de curado (5 hrs., 7 días y 28 días) y las dos temperaturas de curado (5 °C y 30 °C).

##### b) Curado de probetas:

Una vez confeccionadas las probetas se procedió a su curado según fuera en frío (5 °C) o en caliente (30 °C). Luego que las probetas completaran su período de curado especificado, se procedió a su traslado a la cámara de curado normal (20 °C).

##### c) Ensayo de probetas:

Todos los ensayos de resistencia a la compresión se efectuaron en una prensa automática digital marca TONIPAC 3000 para ensayos de hormigón, de 300 ton de capacidad.

## **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

### **Efecto de la temperatura en la trabajabilidad de hormigones fabricados con distintas clases de cemento**

La Tabla 2 muestra la variación de la trabajabilidad con la temperatura del hormigón fresco, para las cuatro clases de cemento (Portland, Portland Puzolánico, Puzolánico y Siderúrgico) y para las dos razones W/C (0,45 y 0,60).

**TABLA 2 Resultados de ensayos de trabajabilidad para distintas clases de cemento.**

CLASE CEMENTO	W/C	CONO DE ABRAMS (cm)		
		TEMPERATURA DE CURADO (°C)		
		5	20	30
Portland "A"	0,45	8,0	7,0	7,0
	0,60	6,8	9,3	7,7
Portland Puzolánico "B"	0,45	8,5	7,5	7,0
	0,60	8,0	7,0	6,5
Puzolánico "C"	0,60	4,5	5,5	8,0
Siderúrgico "D"	0,45	5,5	7,0	5,0
	0,60	7,0	7,5	7,0

**Efecto de la temperatura en la resistencia a compresión de hormigones con distintas clases de cemento**

La Tabla 3 resume los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de hormigones con distintas clases de cemento, razones agua-cemento, temperaturas y tiempo de curado, para diferentes edades del hormigón.

**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**Efecto de la temperatura en la trabajabilidad de hormigones**

La Fig. 5 muestra el efecto de la temperatura en la trabajabilidad de hormigones, con respecto al cono de Abrams obtenido para el mismo hormigón a 20 °C. En la figura los resultados se expresan en relación al hormigón de razón W/C = 0,60 y para las distintas clases de cemento.

De esta figura se desprende que no hay un patrón definido de comportamiento, como lo sugiere la literatura.

**Efecto de la temperatura en la resistencia a compresión**

Ejemplos del efecto de la temperatura en las curvas de resistencia del hormigón versus tiempo se ilustran en las Figuras. 6,7, 8 y 9. En las Figuras 10,11, 12 y 13 se muestran gráficos de resistencias relativas a compresión versus tiempo.

En general en todos los cementos se observa una tendencia a tener mejores resistencias a largo plazo con temperaturas de curado de 5 °C y tendencia a menores resistencia con curado a 30 °C. Esto se observa claramente en los gráficos de resistencia relativa a 20 °C (Figuras 10 a 13).

En los cementos más lentos este efecto es muy marcado (comparar Fig. 12 y 13). En estos cementos las líneas se cruzan y a 90 días las resistencias con curado a 5 °C han sobrepasado a las con curado a 20 °C. Las con curado a 30 °C tienen resistencias similares o superiores, pero su relación es descendente.

Para los cementos más rápidos las tendencias son similares, pero menos marcadas. En el Cementos Portland se observa el mismo efecto (Fig. 13).

Para las curvas de resistencia versus tiempo se observa un cruce de las curvas (Figs. 6,7,8 y 9). Son con menor resistencia inicial las curvas para los hormigones curados a 5 °C y su resistencia es generalmente superior a 90 días. Lo inverso ocurre con las curvas de los hormigones curados a 30 °C.

### **Efecto de la temperatura de curado hasta edad de ensayo en la resistencia a compresión**

Se analizó también el efecto de la temperatura de curado hasta el momento del ensayo. Para los hormigones curados durante 5 horas, a diferentes temperaturas, los resultados corresponden a ensayos realizados a la edad de 1 día. Ejemplos de estos resultados se presentan en la Fig. 14 para el Cemento Portland, Fig. 15 para el Cemento Portland Puzolánico, Fig. 16 para el Cemento Puzolánico y Fig. 17 para el Cemento Siderúrgico.

En estos gráficos se observa que todos los cementos con adiciones muestran curvas ascendentes con la temperatura, es decir presentan mayores resistencias a mayor temperatura, incluso hasta con períodos de curado de 28 días. Esto es diferente a lo indicado en la literatura de hormigones.

En el caso del Cemento Portland el comportamiento es diferente (Fig. 14). En este caso para curados hasta 7 días se da la tendencia anterior, pero para curados hasta 28 días las mayores resistencias se dan para temperaturas de curado menores. Este comportamiento está en concordancia con lo indicado en la bibliografía.

La investigación realizada permitió detectar esta diferencia en el comportamiento de los cementos con adiciones, que son los más utilizados en Chile.

### **Efecto de la temperatura en la madurez de hormigones fabricados con distintas clases de cemento**

En las Figuras 18, 19, 20 y 21 se gráfica la influencia de los ciclos de curado en la relación resistencia-madurez para distintas clases de cemento y razones W/C.

Un aspecto general de las curvas madurez versus resistencia es que son dependientes del tipo de cemento (Fig. 18) y de la razón agua-cemento (Fig. 19). Esto obliga a estudiar curvas de madurez-resistencia para cada hormigón, tratando de simular las condiciones de curado reales en obra (temperaturas).

En los Cementos con Adiciones, se observa una diferencia en la pendiente de las curvas madurez-resistencia (Fig. 20).

Los hormigones curados a menor temperatura muestran curvas de madurez con mayor pendiente y generando mayor resistencia en madureces superiores a 20.000 °C-horas. A madureces inferiores a 10.000 °C-horas, se observa un efecto contrario. Es importante notar la bastante menor pendiente que muestran la curva de madurez para los hormigones curados a 30 °C durante 28 días (Fig. 20).

En el Cemento Portland el efecto de la temperatura en la relación madurez-resistencia es similar a lo señalado anteriormente, siendo más marcado el beneficio de las bajas temperaturas de curado, incluso para madureces bastante menores. En un caso, el curado a 30 °C por 28 días muestra una pendiente bastante inferior a la correspondiente a 5 y 20 °C (Fig. 21).

**TABLA 3** Resumen de resultados de ensayos de resistencia a compresión de hormigones con distintas clases de cemento.

CLASE CEMENTO	W/C	Temperatura Curado	Tiempo Curado	RESISTENCIA A COMPRESION (kgf/cm <sup>2</sup> )						
				1	2	3	7	28	90	
Portland A	0,45	5	5 hr.	186	278	304	424	474	544	
			7 ds.				376	534	596	
			28 ds.					475	536	
		20	28 ds.	230	316	344	435	496	617	
			5 hr.	228	295	313	353	441	536	
			7 ds.				388	433	503	
	0,60	5	5 hr.	108	180	218	304	361	385	
			7 ds.				270	393	439	
			28 ds.					370	460	
		20	28 ds.	101	175	206	288	349	386	
			5 hr.	148	195	211	276	317	364	
			7 ds.				296	323	392	
Portland Puzolánico B	0,45	5	5 hr.	64	140	178	239	336	443	
			7 ds.				169	302	409	
			28 ds.					281	418	
		20	28 ds.	68	142	176	233	286	374	
			5 hr.	143	186	207	256	338	427	
			7 ds.				285	353	409	
	0,60	5	5 hr.	45	103	127	166	246	320	
			7 ds.				114	230	316	
			28 ds.					188	313	
		20	28 ds.	60	102	129	164	240	300	
			5 hr.	88	119	131	166	240	301	
			7 ds.				214	262	300	
Puzolánico C	0,60	5	5 hr.	34	80	118	165	240	346	
			7 ds.				122	237	363	
			28 ds.					198	325	
		20	28 ds.	38	89	119	165	235	347	
			5 hr.	89	112	134	171	260	325	
			7 ds.				186	269	313	
	Siderúrgico D	0,45	5	5 hr.	88	146	181	253	416	520
				7 ds.				154	386	511
				28 ds.					256	498
			20	28 ds.	87		184	241	357	466
				5 hr.	114	143	164	243	408	468
				7 ds.				327	393	460
0,60		5	5 hr.	44	80	101	162	263	327	
			7 ds.				83	270	351	
			28 ds.					167	342	
		20	28 ds.	49	71	95	139	250	328	
			5 hr.	46	81	96	146	221	299	
			7 ds.				220	285	330	
30	28 ds.					306	346			

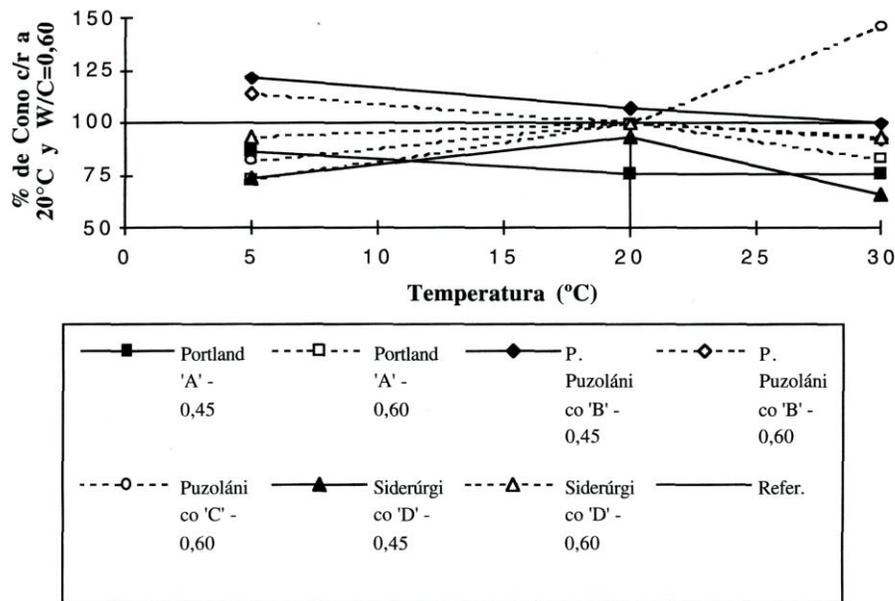


Fig. 5 - Efecto de la temperatura en la trabajabilidad de hormigones con distintas clases de cemento.

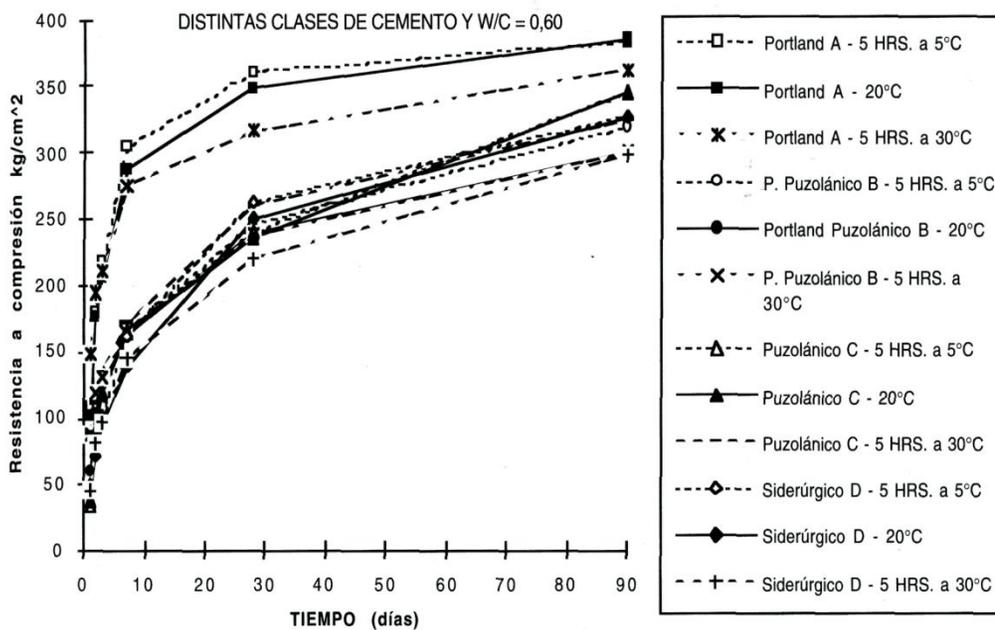


Fig. 6 - Influencia de la temperatura durante las primeras 5 horas.

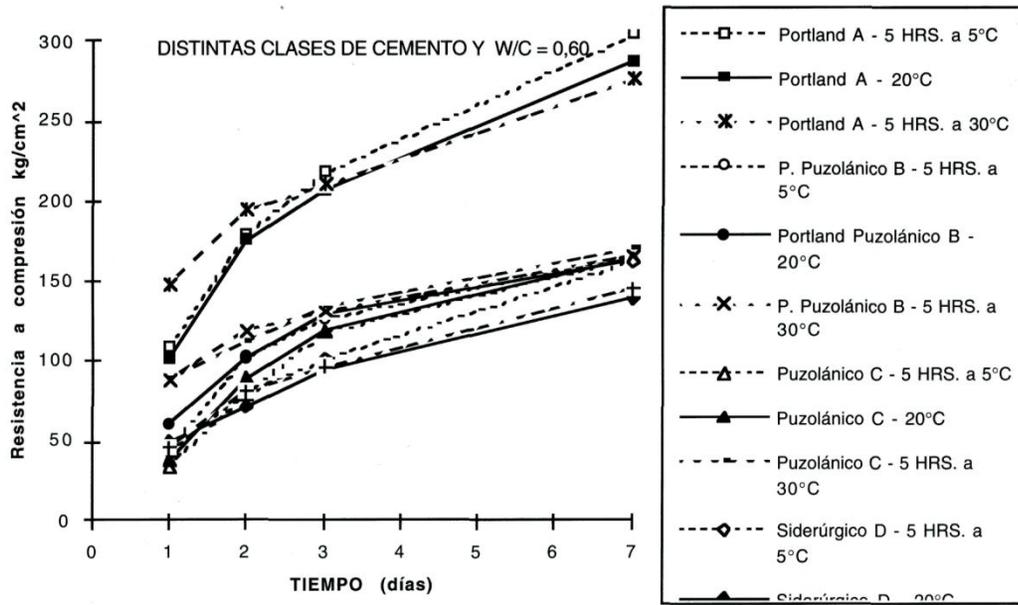


Fig. 7 - Ampliación de la figura 7 - primeros 7 días.

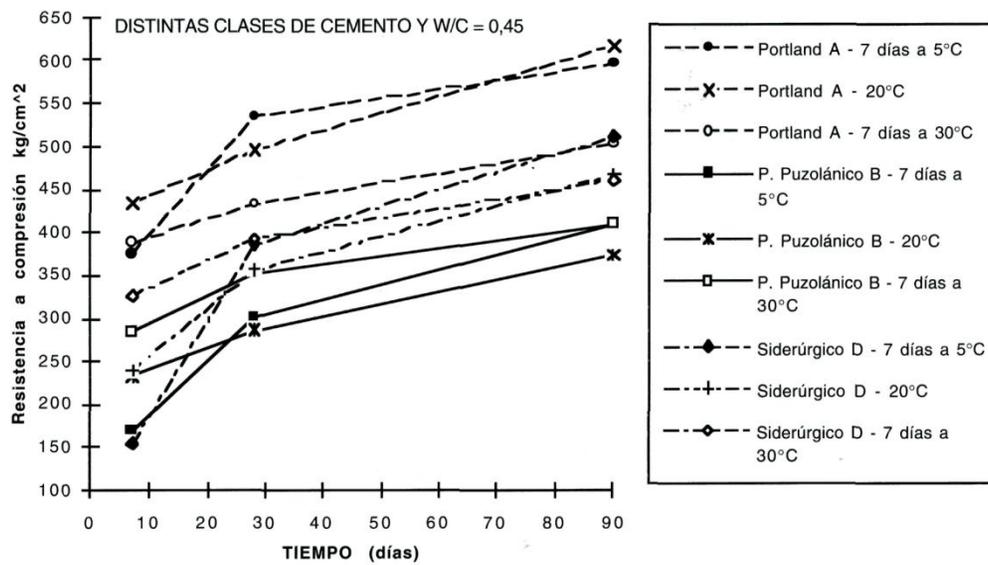
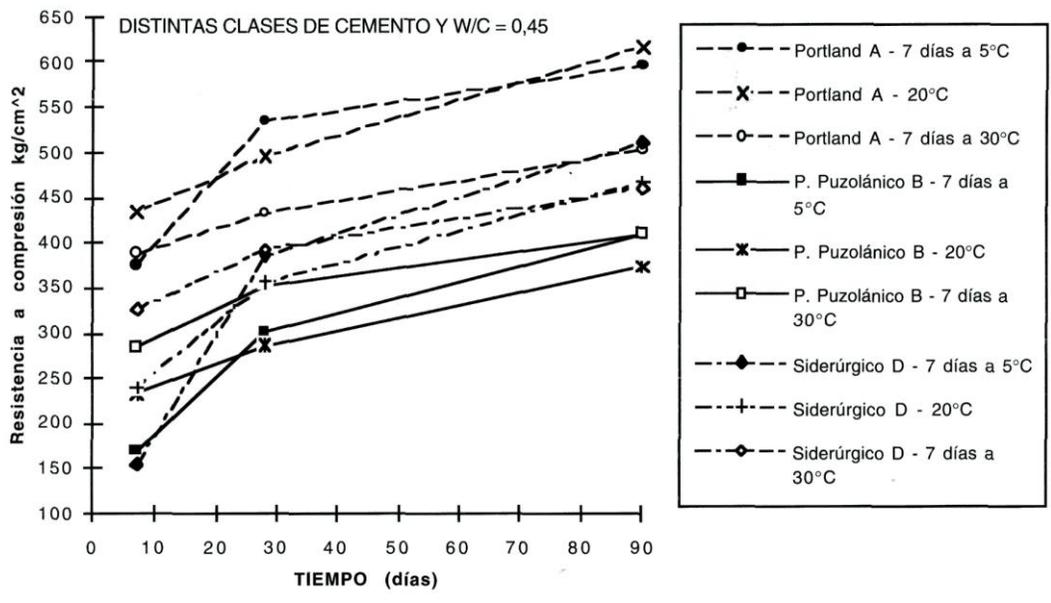


Fig. 8 - Influencia de la temperatura durante los primeros 7 días.



*Fig. 8 - Influencia de la temperatura durante los primeros 7 días.*

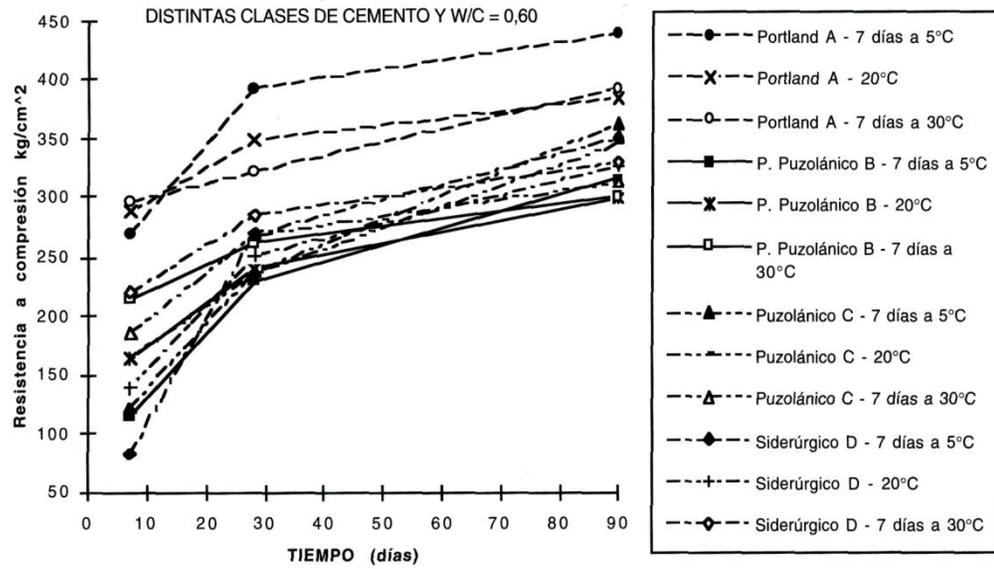


Fig. 9 - Influencia de la temperatura durante los primeros 7 días.

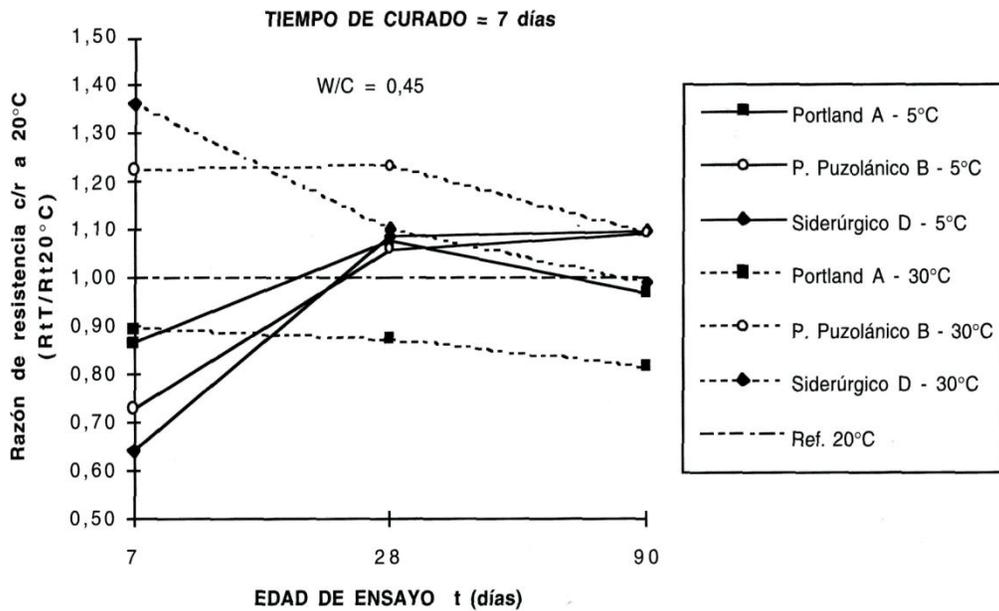


Fig. 10 - Resistencia a compresión a diferentes edades y ciclos de curado con respecto a resistencia a 20°C.

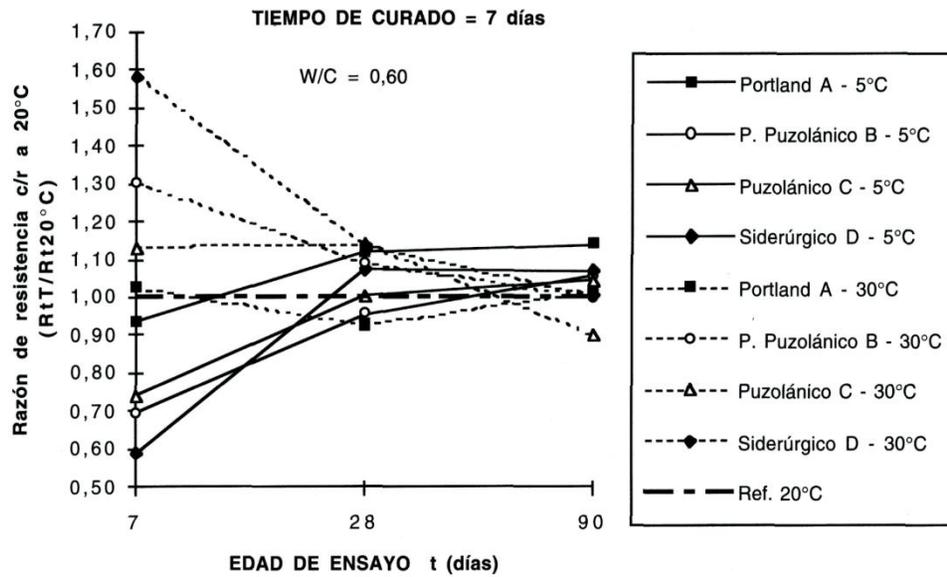


Fig. 11 - Resistencia a compresión a diferentes edades y ciclos de curado con respecto a resistencia a 20°C.

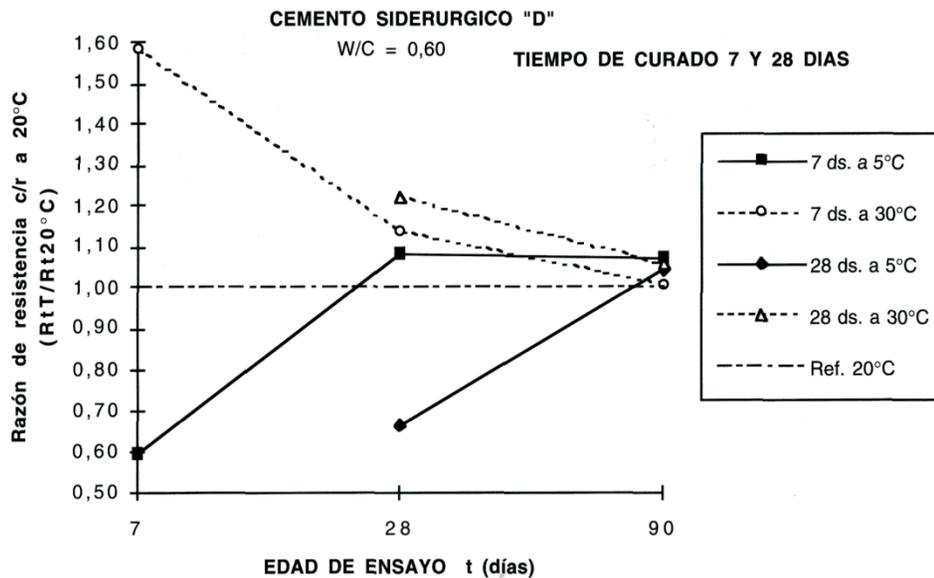


Fig. 12 - Resistencia a compresión a diferentes edades y ciclos de curado con respecto a resistencia a 20°C.

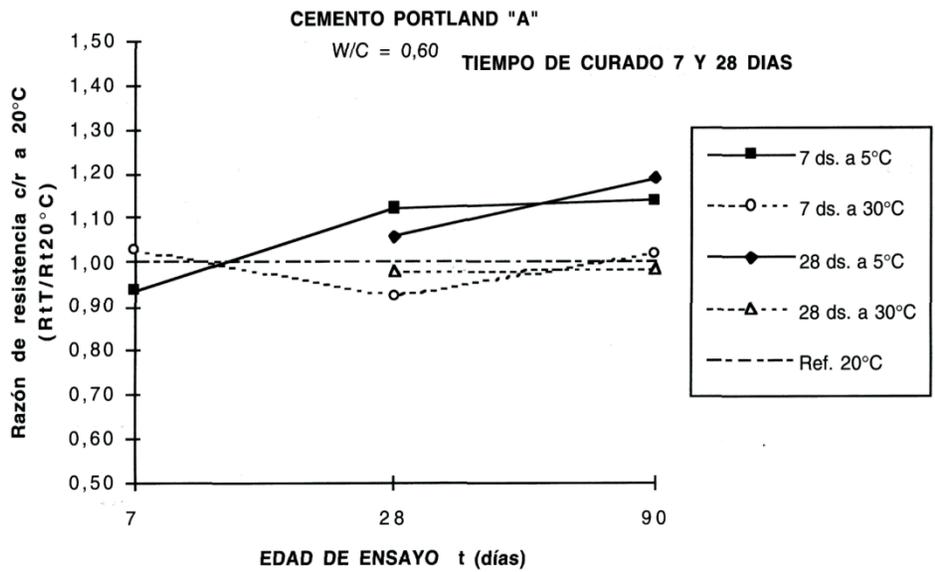


Fig. 13 - Resistencia a compresión a diferentes edades y ciclos de curado con respecto a resistencia a 20°C.

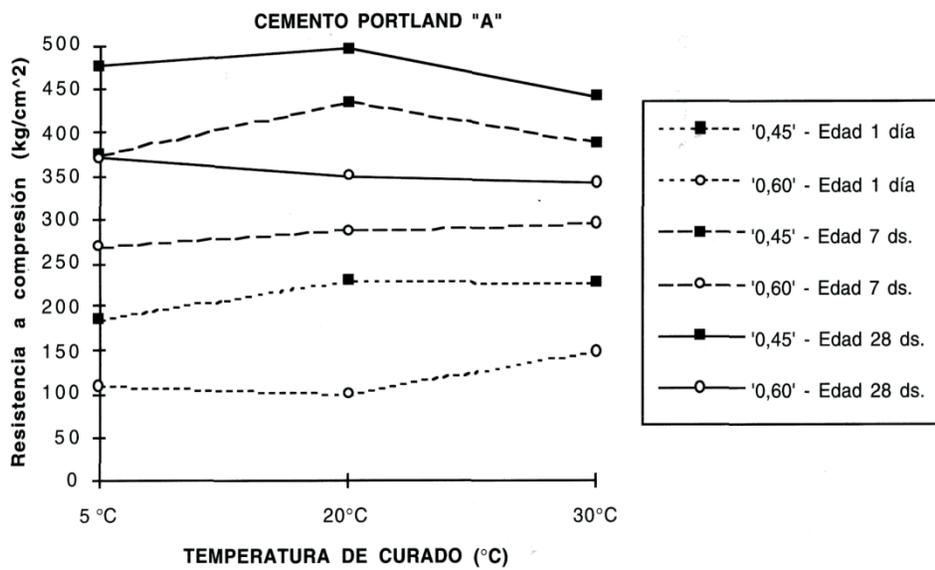


Fig. 14 - Efecto de la temperatura y tiempo de curado en la resistencia a diferentes edades.

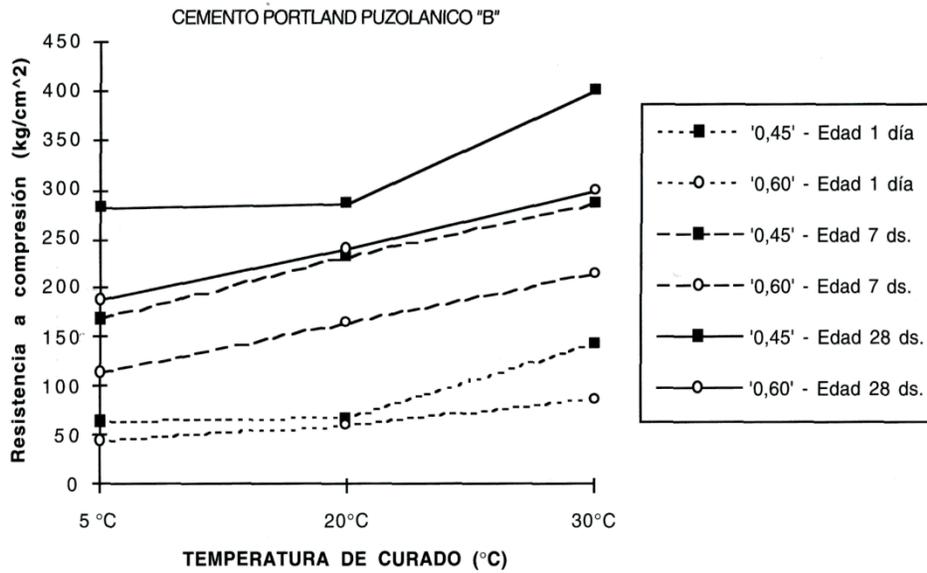


Fig. 15 - Efecto de la temperatura y tiempo de curado en la resistencia a diferentes edades.

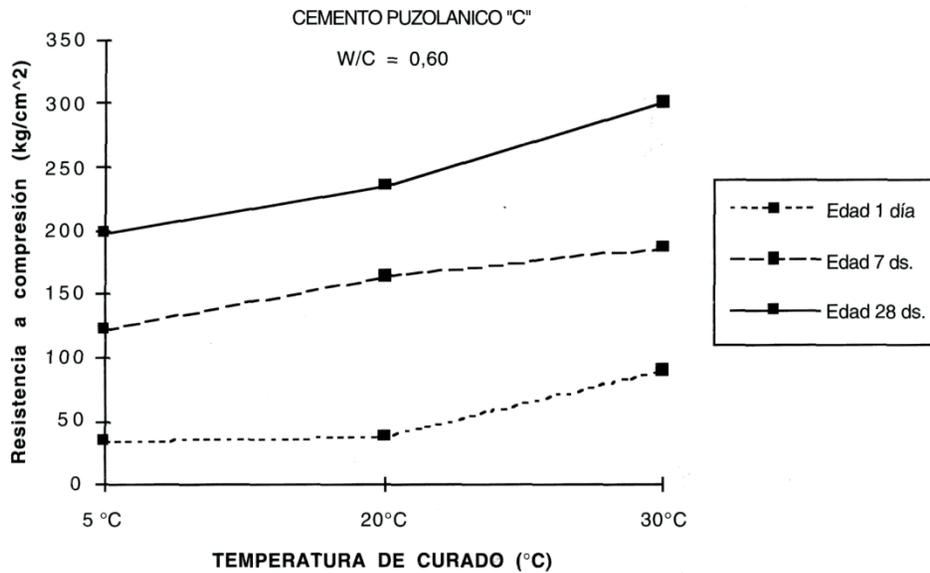


Fig. 16 - Efecto de la temperatura y tiempo de curado en la resistencia a diferentes edades.

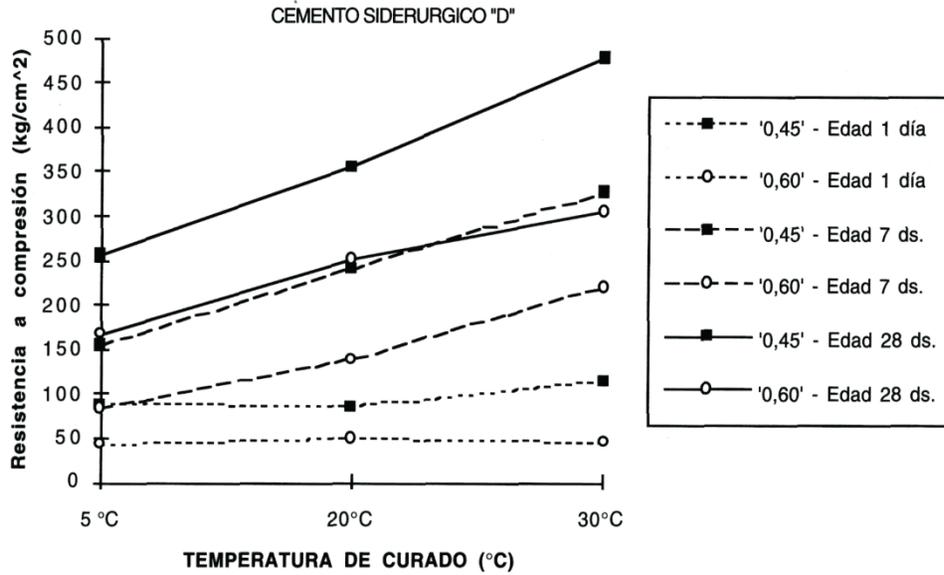


Fig. 17 - Efecto de la temperatura y tiempo de curado en la resistencia a diferentes edades.

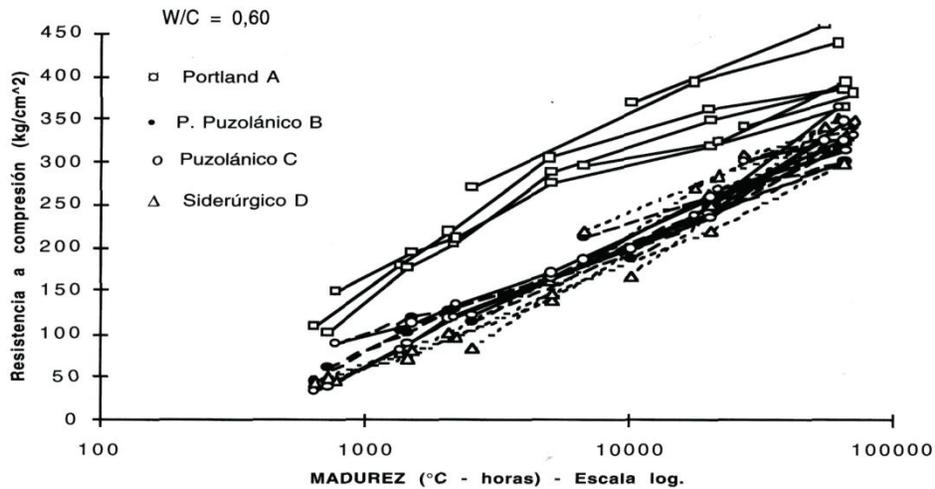
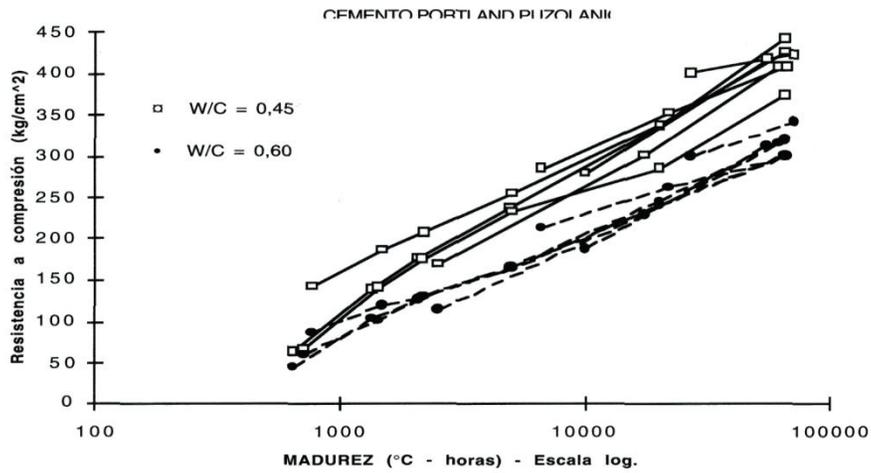
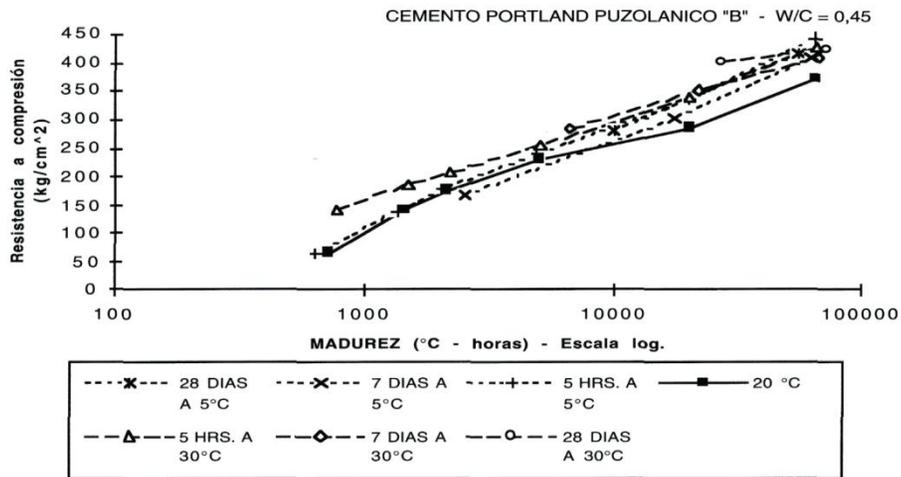


Fig. 18 - Efecto de la clase de cemento en la relación resistencia-madurez.



*Fig. 19 - Efecto de la razón W/C en la relación resistencia-madurez.*



*Fig. 20 - Relación resistencia-madurez.*

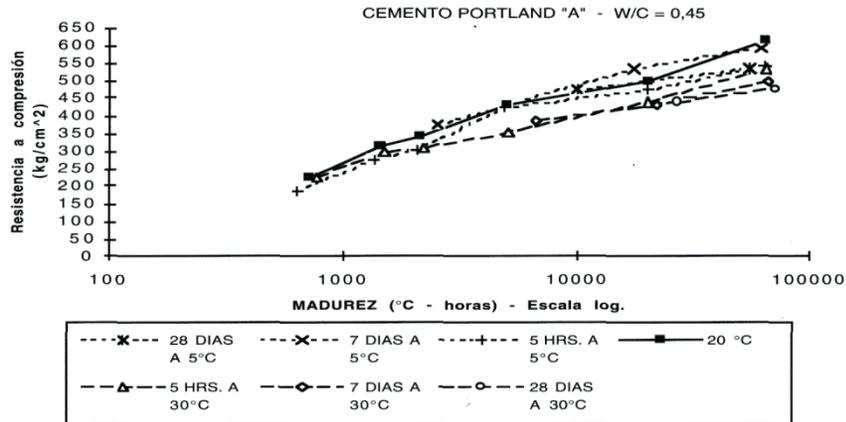


Fig. 21 - Relación resistencia-madurez.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan en general con los resultados encontrados en la bibliografía para el Cemento Portland analizado; sin embargo, con el Cemento Portland Puzolánico, Puzolánico y Siderúrgico, como son la mayoría de los cementos utilizados en Chile, el comportamiento es diferente.

El efecto de la temperatura de curado en la resistencia muestra un óptimo a los 20°C para el Cemento Portland. En el caso de los Cementos con Adiciones, el efecto de la temperatura de curado muestra que la máxima resistencia se obtiene a mayores temperaturas de curado, tanto a largo como a corto plazo.

El efecto de la temperatura de curado en la relación madurez con resistencia de los hormigones, tiene un efecto también diferente para los cementos Portland y con Adiciones, como se analizó en la discusión de resultados.

El efecto de temperatura en la trabajabilidad no se aprecia influyente.

Los resultados mantienen tendencias similares para ambas razones agua/cemento analizadas (0,45 y 0,60).

Para hormigonado en tiempo caluroso, los resultados indican que es indispensable colocar el hormigón a la menor temperatura posible, y mantenerlo a baja temperatura durante su primer tiempo de vida.

Para hormigonado en tiempo frío, hay que elevar la temperatura del hormigón para acelerar la reacción química, que a estas temperaturas es demasiado lenta, y evitar que el agua dentro del hormigón se congele. De las figuras de comportamiento de los cementos ensayados se desprende que la temperatura del hormigón con la que se obtiene la mayor resistencia a largo plazo es 5 °C. Lo importante es evitar a toda costa temperaturas que congelen el agua en el hormigón hasta que éste tenga una resistencia que soporte las tensiones producidas por el agua al transformarse en hielo aumentando su volumen. En esta primera edad se debe evitar el seguir saturando el hormigón con agua, por lo tanto el curado debe ser evitando la evaporación del agua de amasado y no regando. Una vez que el hormigón logra una resistencia mínima (20 a 50 kgf/cm<sup>2</sup>) no importa que el hormigón se sature. Si el hormigón se aísla térmicamente durante su primera edad, hasta que alcance una resistencia mínima, su temperatura de colocación podría ser de hasta 5 °C para cualquier espesor, siempre que la aislación térmica sea suficiente para evitar que la temperatura descienda de 5 °C. Esta temperatura mínima indicada es para asegurar que el hormigón no se congele, lo que ocurre a 0 °C.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto Fondecyt 0815-92) y a la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile por el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

- ACI (1985), "Manual of Concrete Practice", Part 2.
  - British Standard, BS 8110: Part 1: 1985, Structural Use of Concrete, Code of practice for design and construction, Inglaterra.
  - Cement & Concrete Association (1980), TDH 4436, TDH 4440, LS 3604, Advanced Concrete Technology Course, Inglaterra.
  - Covarrubias, J.P. (1988), "Análisis y recomendaciones de hormigonado en climas rigurosos", Revista de Ingeniería de Construcción, N° 5, 1 - 16, Santiago, Chile.
  - Hummel, A. (1966), "Prontuario del Hormigón", Editores Técnicos Asociados S.A., Madrid.
  - Instituto Nacional de Normalización (1985), NCh. 170 Of. 85, "Hormigón - Requisitos Generales", Santiago, Chile.
  - Instituto Nacional de Normalización (1968), NCh. 148 Of. 68, "Cemento - Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales", Santiago, Chile.
  - Neville A. M. (1983), "Properties of Concrete", Pitman Books Ltd., Londres.
  - Pink, V.A. (1967), "Winter Concreting", Cement & Concrete Association, London.
  - RILEM (1963), "Recomendaciones RILEM para el hormigonado en invierno", Boletín N° 21.
  - Verbech G. J. y Helmuth R. A. (1968), "Structures and physical properties of cement paste", Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement; Tokyo, Part III, pp.1-32.
  - Videla, C. y Parada, O. (1988), "Predicción de la Resistencia Potencial del Hormigón", Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, 17-34, Santiago, Chile.
- 
3. The Asphalt Institute, MS-17 "Asphalt overlays for highway and street rehabilitation", 1983
  4. Kennedy C. y Lister N., "Prediction of pavement performance and design of pavement strengthening". TRRL Laboratory Report 833, Crowthorne, 1978.
  5. De Solminihaç H., Videla C., Echeverría G., Gaete R., Caroca A. y Berrios L. Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos, Volumen IX, "Análisis Estructural", Pontificia Universidad Católica de Chile, 1988.
  6. Federal Highway Administration. "Synthesis study of nondestructive testing devices for use in overlay thickness design of flexible pavements", FHWA/RD/83/097, Washington D.C., 1984.
  7. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASTHO Guide for Design of Pavements Structures 1993, Washington D.C., 1993
  8. Claessen A. y Ditmarsch. "Pavement Evaluation and Overlay Design - The Shell Method", Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, 1977.