

## **Influencia de la temperatura de curado: hidratación y resistencia de pastas de cemento con escoria**

C.C.Castellano, V.L.Bonavetti, E.F.Irassar

Depto. de Ingeniería Civil - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Centro - Av.del Valle 5737 - Olavarría (B7400JWI) - Argentina - Tel/fax 54-2284-451055.

e-mail: [ccastellano@fio.unicen.edu.ar](mailto:ccastellano@fio.unicen.edu.ar) ; [ybonavet@fio.unicen.edu.ar](mailto:ybonavet@fio.unicen.edu.ar) ; [frassar@fio.unicen.edu.ar](mailto:frassar@fio.unicen.edu.ar)

---

### **RESUMEN**

Actualmente son muy conocidos los beneficios tecnológicos, económicos y el menor impacto medioambiental que produce el empleo de adiciones minerales como reemplazo del cemento portland. Estas razones, han consolidado el uso de muchas adiciones como: escoria granulada de alto horno, ceniza volante, material calcáreo, humo de sílice, etc.

En los últimos años, los cementos presentan un importante aumento en el contenido de las adiciones; el cual influye sobre la distribución de partículas, sobre la velocidad y naturaleza de las reacciones de hidratación y en consecuencia en su ganancia de resistencia.

El presente trabajo evalúa la influencia de la temperatura en el curado (20, 40 y 60 °C) de pastas con contenido variable de escoria granulada de alto horno (0 a 80 %) elaboradas con relación agua/material cementante de 0,40, sobre la resistencia mecánica. La evolución de la hidratación se estudió a través del análisis de los compuestos de hidratación por DRX y el contenido de agua no evaporable. La resistencia mecánica se evaluó empleando un diseño de experimentos central compuesto centrado.

Los resultados obtenidos indican que a medida que la temperatura de curado aumenta con el incremento del contenido de escoria en el cemento mezcla, se aumentan la resistencia y el contenido de agua no evaporable, y disminuye la cantidad de hidróxido de calcio de la pasta.

**Palabras clave:** Cemento portland, escoria granulada de alto horno, resistencia mecánica, DRX, agua no evaporable, activación térmica.

---

## **Influence of curing temperature: hydration and strength of cement paste with granulated blast furnace**

### **ABSTRACT**

Nowadays it is well known that using blast furnace slag as partial replacements for Portland cement adds technological, economic and environmental benefits. Those are some of the reasons why cements containing several additions (blast furnace slag, fly ash, calcareous material, etc) are commonly used.

In recent years, blended cements started to increase amounts of additions as replacement of Portland cement; in this regard these variations influence the rate and the mechanism of hydration and, consequently, strength development.

The present work evaluated the effect of different curing temperatures (20, 40 and 60 °C) on the mechanical strength of cement paste with different proportions of granulated blast-furnace slag (0 to 80 %). Pastes were prepared with water/cementitious material ratio (w/cm) equal to 0,4.

The hydration evolution was determined following the hydration products using XRD analysis and evaluated the content of non evaporable water. Mechanical strength was evaluated through central composite experimental design.

When granulated blast-furnace slag content increases with curing temperature, the results show that mechanical strength and non evaporable water increases, while the calcium hydroxide content decreases.

**Keywords:** Portland cement, Granulated blast furnace slag, mechanical strength, XRD, non evaporable water, thermal activation.

---

## 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de resistencia de un cemento con medio o alto contenido de escoria depende del efecto filler y de la reacción de la adición. Cuando las partículas de escoria son molidas finamente se dispersan dentro de la matriz produciendo un gran número de sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento portland, acelerando su reacción inicial [1]. Sin embargo, este efecto físico no puede compensar al efecto de dilución y los hormigones con medio y elevado contenido de escoria registran bajas a muy bajas resistencias iniciales [2]. Con el transcurso de la hidratación y la reacción de la adición se produce una matriz más densa y homogénea. Complementariamente, se reduce el efecto pared en la zona de transición entre la matriz y el agregado, densificando la microestructura y aumentando las propiedades mecánicas y durables del hormigón [3]. En general, la escoria que usualmente se emplea tiene una superficie específica Blaine de 350 a 500 m<sup>2</sup>/kg, en consecuencia presenta hasta los 3 días una muy baja contribución con la resistencia; alguna contribución entre los 3 y 14 días y una contribución considerablemente mayor a edades posteriores [4].

Uno de los argumentos que más se emplea en la práctica para limitar el uso de los cementos con elevado contenido de escoria es su baja resistencia inicial. Sin embargo, este hecho puede mitigarse a partir del aumento de la velocidad de reacción de la escoria a través de su activación térmica, física o química.

Con el curado a alta temperatura, se acelera la ganancia de resistencia de la escoria, debido a que los hidróxidos alcalinos del cemento tienen mayor solubilidad y en consecuencia se incrementa la reacción inicial de la adición [4]. En este sentido, Escalante et al. [5,6] han determinado que la reactividad y la resistencia de las pastas con escoria se incrementa con la temperatura de curado. En pastas de cemento con escoria (30 %) hidratadas a temperaturas de 10, 30 y 50 °C, han observado que al cabo de los 28 días la cantidad de escoria reaccionada es de 30, 35 y 42 %, respectivamente. Este comportamiento es atribuido no sólo a la mayor cantidad de escoria que reacciona, sino también a la microestructura más densa de los productos de hidratación y a una estructura de poros más discontinua [7].

Adicionalmente, Miura e Iwaki [8], observaron que la temperatura de curado también depende de la finura de la escoria, así cuando la escoria es muy fina (800 m<sup>2</sup>/kg), no es necesario activarla térmicamente para aumentar la resistencia inicial, debido a que el menor tamaño de partículas produce en sí mismo un aumento de la velocidad de hidratación [9]. Sin embargo, cuando la escoria tiene una finura convencional (< 400 m<sup>2</sup>/kg) es necesario un aumento en la temperatura de curado para alcanzar una adecuada resistencia inicial en el hormigón [10].

En este trabajo se estudia la influencia de la temperatura en el curado (20, 40 y 60 °C) de pastas con escoria granulada de alto horno (0 a 80 %), sobre la resistencia mecánica y su efecto sobre el mecanismo de hidratación.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

#### 2.1.1 Cemento:

Para la realización de los ensayos se utilizó un cemento portland sin adiciones (CPN, IRAM 50000), con una composición mineralógica de 62 % de C<sub>3</sub>S, 14 % de C<sub>2</sub>S, 0 % de C<sub>3</sub>A y 16 % de C<sub>4</sub>AF, categoría resistente CP40 (f<sub>c</sub> > 40 MPa a 28 días ensayados sobre prismas de morteros ISO-RILEM). La composición química y las propiedades físicas de este material se muestran en la Tabla 1.

#### 2.1.2 Escoria granulada de alto horno:

La escoria granulada de alto horno (E) presentó un módulo químico (C+M+A/S) de 1,76 y una finura Blaine de 460 m<sup>2</sup>/kg. Su análisis por DRX mostró sólo una pequeña proporción de materiales cristalinos (melilita) en 2θ = 30,0° (d: 3.00), evidenciando el rápido enfriamiento al que fue sometida (Figura 1). La composición química y las propiedades físicas se informan en la Tabla 1.

#### 2.1.3 Cementos mezclas estudiados:

Los cementos con adiciones se obtuvieron por reemplazos variables de cemento CPN por escoria. Los contenidos estudiados fueron 0, 20, 40, 60 y 80 %, definiendo así cementos mezclas con un rango de medio a alto contenido de adiciones.

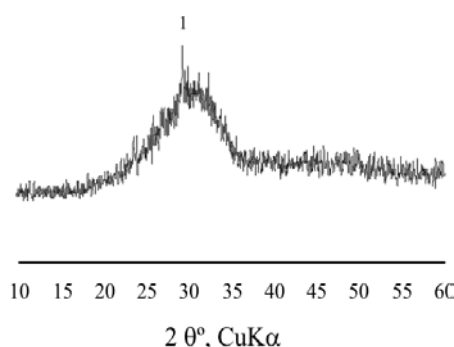
**Tabla 1:** Composición química y propiedades físicas de los materiales.

	Cemento portland, CPN	Escoria granulada de alto horno, E
SiO <sub>2</sub>	20,98	34,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,46	11,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,23	1,04
CaO	63,52	38,58
MgO	0,86	9,54
SO <sub>3</sub>	2,35	0,84
K <sub>2</sub> O	0,95	0,41
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,15
Pérdida por calcinación	2,12	1,30
Densidad	3,10	2,95
Retenido sobre tamiz, %		
75 μm (#200)	0,30	0
45 μm (#325)	0,11	0,90
Parámetro de posición, x' (μm) <sup>a</sup>	14,50	19,87
Parámetro de homogeneidad, n <sup>b</sup>	1,20	1,04
<sup>a</sup> Diámetro característico de la distribución de tamaños de partículas, obtenido a una masa acumulada de 63,2 %.		
<sup>b</sup> Pendiente de la curva de distribución del tamaño de las partículas que representa el ancho de la misma.		

## 2.2 Procedimientos

Con los cementos mezclas antes descriptos se elaboraron las pastas empleando como agua de mezclado agua destilada. La relación agua/material cementante (a/mc) fue de 0,40, registrándose en todos los casos una fluidez adecuada al sistema de compactación empleado. Las pastas de cemento mezcla se identifican con el término CPN más (+) el contenido de escoria incorporado.

Las pastas fueron colocadas en moldes de 25 x 25 x 282 mm y compactadas en dos capas de 25 golpes cada una. Inmediatamente los moldes fueron cubiertos con un film plástico dividiéndose en tres grupos y se colocaron a 20, 40 y 60 °C con una variación ± 1°C.



**Figura 1:** Difractograma de la escoria granulada de alto horno, 1. Melilita

Después de 24 horas las probetas se retiraron de los moldes, se colocaron en recipientes herméticos y se curaron, con agua saturada con cal en el caso de las pastas con CPN y sólo con agua en el caso de las pastas con escoria.

El volumen de agua de curado se mantuvo comprendido entre 3,5 y 4,0 veces el volumen de las probetas. Cada grupo de probetas fue curado a las temperaturas antes mencionadas, permaneciendo a esa temperatura hasta las edades de estudio (2, 7, 28 y 90 días).

### 2.3 Resistencia a compresión

La resistencia se evaluó sobre probetas prismáticas, con una sección transversal de 25 x 25 mm. Los resultados informados en la Tabla 2, corresponden al promedio de seis determinaciones por edad.

### 2.4 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión se determinó sobre probetas de 25 x 25 x 85 mm. El sistema de carga empleado fue simplemente apoyada cargada al centro de la luz, con una luz entre apoyos de 65 mm. Los resultados informados en la Tabla 2, corresponden al promedio de tres determinaciones por edad.

### 2.5 Agua no evaporable

Para estimar el progreso de la hidratación se analizó el contenido de agua no evaporable de acuerdo al procedimiento propuesto por Powers [11], asumiendo que la totalidad de la escoria reacciona para producir CSH.

### 2.6 Difracción de Rayos X (DRX)

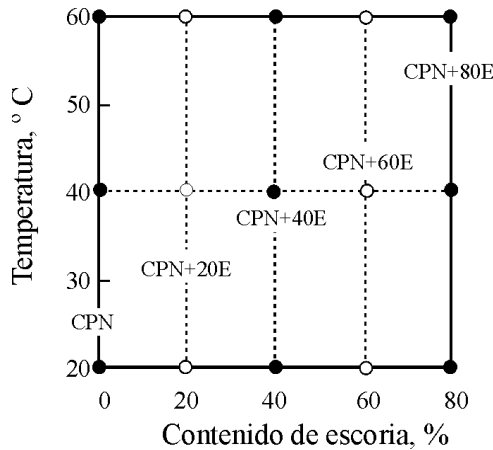
Las determinaciones se realizaron con un difractor Philips X'Pert equipado con monocromador de grafito, usando radiación  $\text{CuK}\alpha$ , y operando a 40 kV y 20 mA. El registro se realizó a una velocidad de  $2^\circ/\text{min}$  y el intervalo de paso fue de  $0,02^\circ$ . El análisis semicuantitativo del hidróxido de calcio (CH) se realizó integrando el área bajo el pico de  $2\theta = 18,09^\circ$ ,  $d = 4,90$  nm.

**Tabla 2:** Valores de Resistencia a Compresión y Resistencia a Flexión de las pastas estudiadas.

Temperatura, °C	Muestra	Resistencia a compresión, MPa				Resistencia a flexión, MPa			
		2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d
20	CPN	46,14	59,95	69,00	84,22	8,20	9,70	10,90	11,95
20	CPN+20E	39,52	54,00	73,00	81,31	7,65	10,26	11,99	13,81
20	CPN+40E	28,86	41,20	65,00	81,60	5,83	8,62	10,65	13,56
20	CPN+60E	18,45	28,00	55,01	67,18	3,80	5,51	9,00	10,77
20	CPN+80E	9,20	19,30	43,01	49,60	2,53	4,39	7,49	9,23
40	CPN	48,93	58,00	64,00	72,48	7,85	8,95	9,97	11,01
40	CPN+20E	41,01	56,00	71,01	75,94	6,84	9,52	11,72	13,21
40	CPN+40E	31,50	56,00	68,00	74,43	5,98	9,75	12,37	13,94
40	CPN+60E	28,42	42,00	59,26	68,21	4,75	6,74	9,47	11,63
40	CPN+80E	21,86	34,00	48,14	57,95	4,56	6,40	8,88	10,51
60	CPN	49,52	54,00	60,00	67,20	8,07	8,47	9,30	10,20
60	CPN+20E	49,84	59,01	65,01	72,46	8,00	10,00	11,20	12,02
60	CPN+40E	44,78	53,01	67,01	73,60	7,50	9,85	12,58	13,35
60	CPN+60E	45,41	50,00	62,00	71,63	7,60	9,01	10,80	12,38
60	CPN+80E	40,91	44,00	53,01	60,85	6,46	7,91	9,71	11,40

## 2.7 Diseño de experimentos

Con el fin de evaluar al cemento con adiciones y a la temperatura de curado como un sistema de variables interrelacionadas, se adoptó un diseño de experimentos central compuesto centrado [12], en el cual las dos variables experimentales son los porcentajes de reemplazo del cemento por escoria ( $x_1$ ) y la temperatura ( $x_2$ ). La Figura 2 muestra el dominio definido por los puntos experimentales (●) y los puntos de ajuste (○) del diseño de experimentos adoptado. A partir de este sistema la resistencia mecánica se determinó por el análisis de las superficies de respuesta.



**Figura 2:** Diseño de experimento de los cementos con adiciones estudiados.

La ecuación del modelo está dada por la fórmula (1)

$$(1) Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2$$

donde, Y: es la resistencia a compresión o a flexión a una edad determinada,  $x_1$  y  $x_2$ : son las variables experimentales y  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ : son los coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados que se informan en la Tabla 3.

El coeficiente  $R^2$  fue mayor a 0,86 indicando una buena correlación entre los valores experimentales y calculados. La máxima diferencia entre la resistencia a compresión experimental y calculada fue de  $\pm 4,5$  %, mientras que esta diferencia para la resistencia a flexión fue de  $\pm 8,3$  %.

**Tabla 3:** Coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados y  $R^2$ .

Edad, días	Coeficientes resistencia a compresión						$R^2$	Coeficientes resistencia a flexión						$R^2$
	$\beta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		$\beta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	
2	55,3	-0,67	-0,51	0,01*	7,30*	9,16*	0,98	11,5	-0,09	-0,19	-0,19*	2,21*	1,45*	0,97
7	53,0	-0,46	0,45	-3,25*	-6,99*	9,88*	0,97	11,4	-0,03	-0,08	-1,15*	0,58*	1,81	0,94
28	71,8	0,06	-0,06	-6,76*	-2,51*	6,70*	0,97	11,1	0,04	-7,7*	-1,34*	-0,31*	1,27*	0,86
90	79,6	0,36	-0,21	-1,0*	-1,41*	7,10*	0,92	12,8	0,06	-0,02	-1,60*	-0,48*	-1,41*	0,90

(\*) el número informado  $\times 10^{-3}$

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Resistencia a compresión

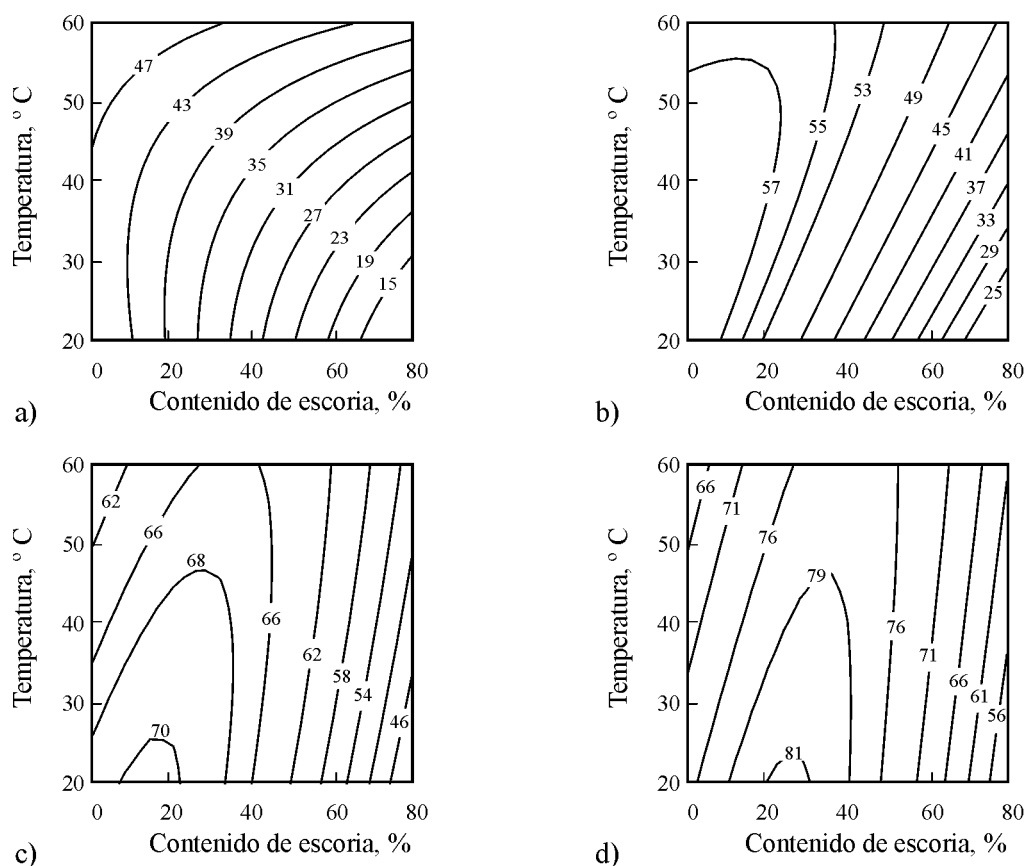
La Figura 3 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a compresión de las pastas estudiadas a diferentes edades. A 2 días (Figura 3a) se puede observar la importante pérdida de resistencia

que se produce a medida que aumenta el contenido de escoria en el cemento cuando la temperatura de curado es de 20 °C. Así, la pasta CPN registra una resistencia de 46,1 MPa, la pasta CPN+40E 28,9 MPa (disminución de 37 %), mientras que la pasta CPN+80E sólo alcanza 9,2 MPa (pérdida de 80 %). También, se puede observar en la misma, que a medida que la temperatura de curado aumenta se registra un aumento en la resistencia de todas las pastas y que este incremento es más importante a medida que el contenido de escoria en el cemento mezcla aumenta. Los incrementos de este parámetro obtenidos entre las temperaturas de 20 y 60 °C fueron 24, 52, 126 y 300 % para las pastas CPN+20E, CPN+40E, CPN+60E y CPN+80E, respectivamente.

En función de los resultados obtenidos, se puede considerar que la activación térmica de la escoria permite obtener a dos días pastas con similar resistencia (zona delimitada por las curvas de isorrespuestas de 43 y 47 MPa) a la registrada por el cemento CPN (20°C) con hasta 60 % de escoria y una temperatura de curado de 60 °C. Además, también produce una mayor ganancia de la resistencia para elevados contenidos de adición dado por el aumento en la velocidad de reacción de la misma.

A 7 días (Figura 3b), las pérdidas de resistencia a 20 °C de las pastas con escoria son menores a las registradas a 2 días. Esto es; la pasta CPN+40E presenta una resistencia 30 % menor a la alcanzada por la pasta CPN, mientras que este valor para la pasta CPN+80E es de 68 %. El cambio en la pendiente de las curvas de isorrespuestas indica que la ganancia de resistencia de las pastas con escoria dada por el aumento en la temperatura de curado también resulta menor. Aún así, la pasta CPN+80E registra una resistencia 88 % mayor entre las temperaturas de 20 y 60 °C.

A 28 días (Figura 3c) se produce un giro de la superficie de respuesta trasladándose la zona de máxima resistencia a valores de  $x_1$  y  $x_2$  : 20 % y 20 °C respectivamente, poniendo en evidencia la disminución de la resistencia alcanzada por la pasta CPN cuando la temperatura de curado se incrementa.



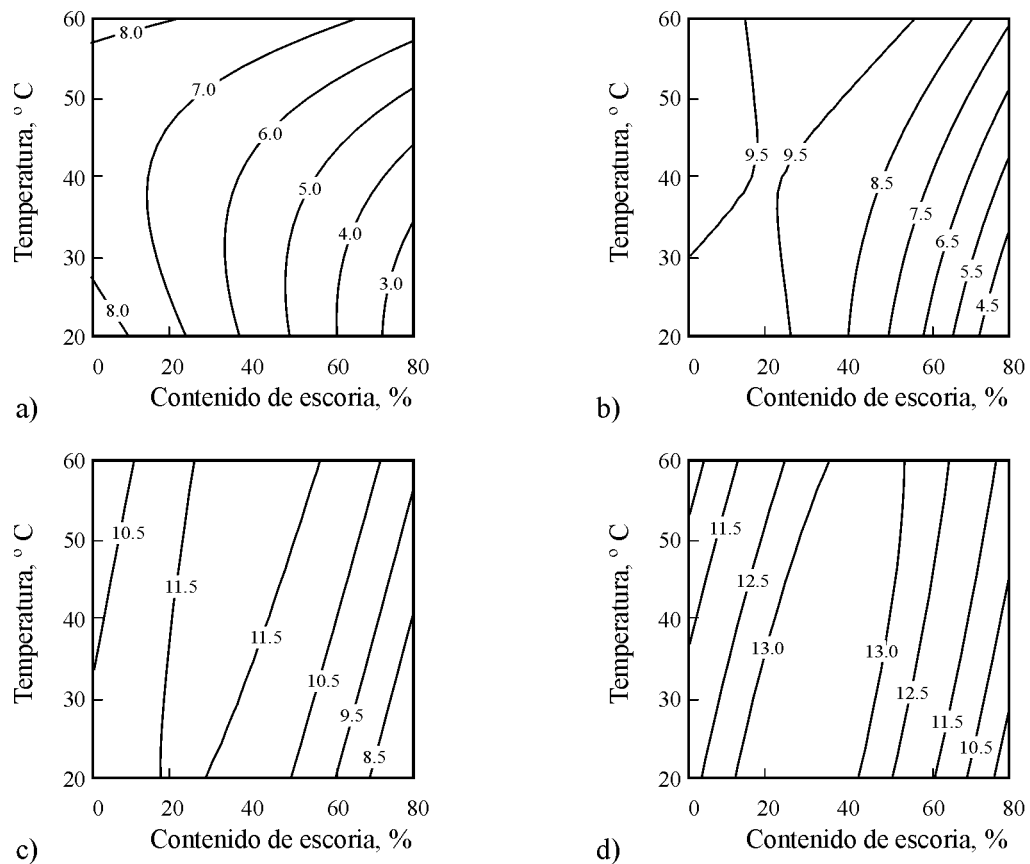
**Figura 3:** Curvas de isorrespuestas de la resistencia a compresión de los morteros. a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días y d) 90 días.

Un comportamiento similar se manifiesta a los 90 días (Figura 3d) registrándose que la línea correspondiente a 76 MPa que contiene a las pastas con valores de  $2 \% < x_1 < 50 \%$  alcanzan una resistencia superior a la obtenida por la pasta CPN.

### 3.2 Resistencia a flexión

La Figura 4 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a flexión de las pastas estudiadas a las distintas edades. A 2 días (Figura 4a) el contorno de las curvas presentan un comportamiento similar al registrado por la resistencia a compresión, observando que cuando la temperatura de curado es de 20 °C se produce una disminución de la resistencia con el aumento en el contenido de escoria, alcanzando a ser del orden del 63 % para la pasta CPN+80E. Mientras que cuando la temperatura de curado es mayor, las pastas con escoria registran menores pérdidas de resistencia con respecto al valor alcanzado por la pasta CPN. Así, para las temperaturas de 40 y 60 °C en las pastas con CPN+80E, esta disminución es del orden del 51 y 16 %, respectivamente.

A 7 días (Figura 4b), se puede determinar que la resistencia de la pasta CPN a 20 °C puede alcanzarse con hasta 25 % de escoria en el cemento, mientras que si la temperatura de curado es de 60 °C, esta resistencia puede lograrse con valores de  $15\% < x_1 < 55\%$  (zona delimitada por la curva de 9,5 MPa). Esto pone en evidencia la importante activación de la adición que produce la temperatura de curado.



**Figura 4:** Curvas de isorrespuestas de la resistencia a flexión de los morteros. a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días y d) 90 días.

A 28 y 90 días (Figuras 4c y d), las curvas de isorrespuestas giran y tienden a ser paralelas a la variable  $x_2$ , indicando que la resistencia de las pastas a estas edades es prácticamente independiente de la temperatura de curado. Valores de resistencias mayores al obtenido por la pasta CPN a 20 °C pueden alcanzarse con hasta 60 % de escoria.

### 3.3 Agua no evaporable

La temperatura de curado modifica la velocidad de hidratación del cemento y de la escoria y esto tiene un efecto directo sobre la resistencia del cemento mezcla.

En la Figura 5a se muestra la evolución del agua no evaporable de la pasta CPN con diferentes temperaturas de curado. En la misma puede observarse que a 2 y 7 días se produce un incremento de este parámetro con el aumento de la temperatura de curado, mientras que este comportamiento tiende a revertirse

a partir de los 28 días. Así, a 90 días la pasta curada a 20 °C registra un contenido de agua no evaporable 7 y 11 % mayor que el obtenido en las pastas curadas a 40 y 60 °C, respectivamente.

Por otra parte, en trabajos previos [13,14] con temperaturas de curado de 20 °C se ha demostrado que la incorporación de escoria al cemento produce un aumento en el contenido de agua no evaporable en las primeras edades, debido al efecto filler; y en las edades más avanzadas dado por la hidratación de la adición.

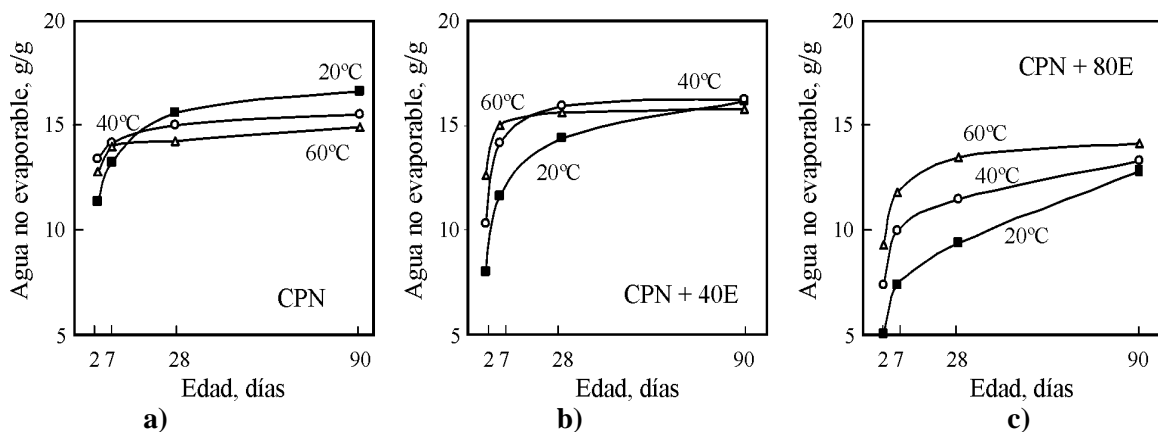
Sin embargo, para elevados contenidos de escoria en el cemento, el efecto físico no puede compensar el efecto de dilución del mismo producido por la menor cantidad de material inicialmente reactivo, generándose una disminución en el contenido de agua no evaporable y en la resistencia mecánica a medida que se incrementa el contenido de escoria [15].

Esto puede observarse en la Figura 5 comparando las curvas de agua no evaporable a 20 °C de las pastas CPN, CPN+40E y CPN+80E. Así a 2 días, las pérdidas de agua no evaporable de las pastas CPN+40E y CPN 80E son del 30 y 55 %, con respecto a la pasta CPN. Estos resultados permiten justificar la disminución de la resistencia mecánica que registraron las pastas con escoria (ver Figura 3a y 4a ).

No obstante, cuando se incrementa la temperatura de curado las pastas con escorias registran importantes aumentos en el contenido de agua no evaporable (Figuras 5b y c), a 2 días el agua no evaporable de la pasta CPN+40E crece 30 y 58 % para las temperaturas de 40 y 60 °C con respecto a la registrada a 20 °C, mientras que estos incrementos para la pasta CPN+80E son del 46 y 84 %, respectivamente.

Para la pasta CPN+40E, entre los 7 y 90 días no se verifican diferencias muy importantes en el contenido de agua no evaporable obtenido entre 40 y 60 °C (Figura 5b). Mientras que para la pasta CPN+80E entre las edades de 7 y 28 días siempre se producen aumentos considerables del agua no evaporable con el aumento de la temperatura (en el orden de 20 %). A 90 días este aumento es de menor magnitud alcanzando a ser sólo de 6 % (Figura 5c). Este comportamiento puede atribuirse a que, la temperatura de curado óptima de un cemento con escoria también depende de las proporciones relativas entre el cemento y la adición, debido a que estos materiales responden diferencialmente a las variaciones de temperatura de curado.

Una elevada temperatura de curado aumenta el grado de hidratación inicial de los compuestos del cemento portland, pero este comportamiento se revierte a edades avanzadas, dado que cuando la velocidad de hidratación es rápida, no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación que están alejados de los granos de cemento, ni para que ocurra una precipitación uniforme dentro de los espacios intersticiales. Consecuentemente la acumulación de una elevada concentración de productos de hidratación en las cercanías de los granos de cemento anhidro, retrasa su hidratación posterior [16]. En contrapartida, la escoria requiere una mayor energía de activación y de acuerdo a la fórmula de Arrhenius la temperatura ( en el rango investigado) produce un incremento en su reacción a todas las edades estudiadas [2].



**Figura 5:** Agua no evaporable de las pastas a distintas temperaturas de curado. a) CPN, b) CPN + 40E y c) CPN + 80E.

Entonces, como regla general se puede adoptar que a medida que aumenta el contenido de escoria la temperatura de curado debe incrementarse para acelerar su hidratación y aumentar la resistencia, fundamentalmente inicial, del cemento mezcla.

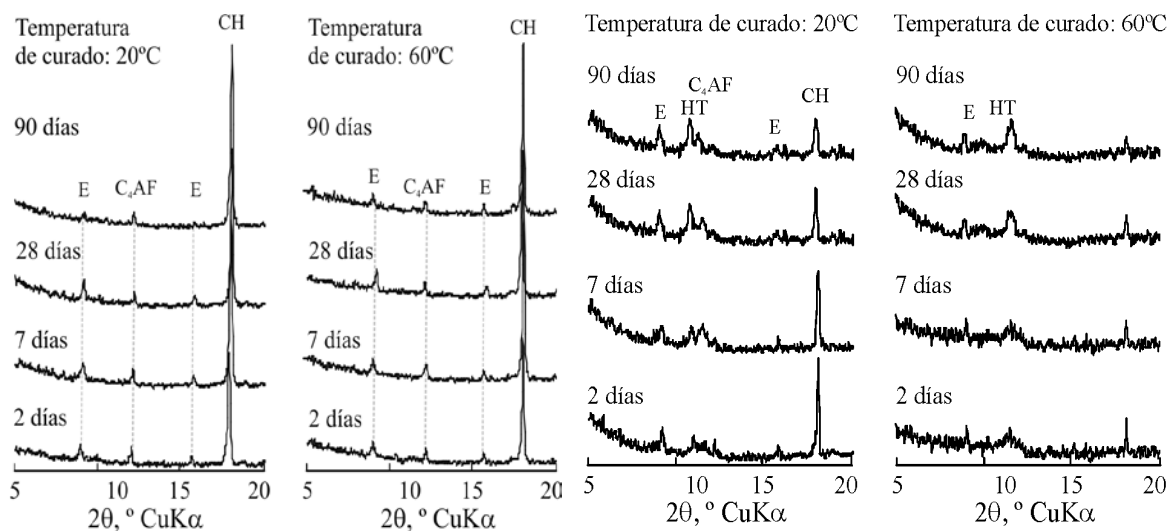


### 3.4 Difracción de Rayos X

Los productos de hidratación detectados por DRX en la pasta CPN fueron CH y ettringita (Figura 6). La disminución en la intensidad del pico de CH a partir de los 7 días entre las temperaturas de 20 y 60 °C, corrobora la menor hidratación alcanzada por el cemento cuando la temperatura de curado aumenta (Tabla 4).

Este comportamiento puede ser atribuido a que el incremento de la temperatura acelera las reacciones químicas de la hidratación del cemento CPN, aumentando la resistencia temprana de la pasta. Sin embargo, una rápida hidratación inicial puede generar una microestructura menos homogénea con un elevado porcentaje de poros y una disminución de la hidratación a edades más avanzadas [5] debido a que la acumulación de los productos de hidratación sobre los granos de cemento anhidro retrasa su hidratación posterior [16], generando una menor ganancia de la resistencia de la pasta de cemento a edades avanzadas (ver Figuras 3c y d, 4c y d).

Adicionalmente, los compuestos de hidratación detectados por DRX en la pasta CPN+80E fueron CH, ettringita y una fase similar a la hidrotalcita [17] (Figura 7), con menor cantidad de CH cuando la temperatura de curado fue de 60 °C (Tabla 4). El aumento en el contenido de agua no evaporable y la disminución del pico de CH (compuesto consumido durante la hidratación de la escoria) justifica el importante incremento de la resistencia inicial que tienen los cementos con escoria a medida que aumenta la temperatura. Esto puede deberse a que la temperatura aumenta la solubilidad de los hidróxidos alcalinos [4] y la velocidad de reacción de las fases componentes del cemento generando una mayor disponibilidad de hidróxidos que acelera la hidratación inicial de la escoria [17-18]. No obstante, este incremento no sólo es debido a la mayor cantidad de escoria que ha reaccionado, pues algunos autores [6-7] también lo atribuyen a la microestructura más densa de los productos de hidratación y a la obtención de una estructura de poros más discontinua.



**Figura 6:** DRX de la pasta CPN a 2, 7, 28 y 90 días. E: ettringita, CH: hidróxido de calcio.

**Figura 7:** DRX de la pasta CPN+80E a 2, 7, 28 y 90 días. E: ettringita, CH: hidróxido de calcio, HT fase similar a hidrotalcita

**Tabla 4:** Análisis semicuantitativo del pico de CH (2θ: 18.09°, d: 4.90nm), en cps.

Edad, días	Pasta CPN		Pasta CPN+80E	
	20°C	60°C	20°C	60°C
2	33,92	41,96	11,19	3,04
7	52,26	45,59	8,43	2,50
28	58,52	49,19	6,85	1,76
90	59,93	49,35	5,13	1,19

### 3.5 Relación resistencia compresión vs. flexión

Por último, la Figura 8 muestra que independientemente de la temperatura de curado, la incorporación de escoria al cemento produce un incremento en la relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión [2].

El aumento en la compacidad de la matriz [4], es la responsable de este comportamiento, pues la cantidad de CH presente en la pasta disminuye a medida que aumenta el contenido de escoria, por el efecto de dilución del cemento y por el consumo de este producto durante su hidratación.

Así para una resistencia a compresión de 45 MPa, la resistencia a flexión alcanzada por la pasta con escoria es 12 % mayor que la registrada por la pasta CPN.

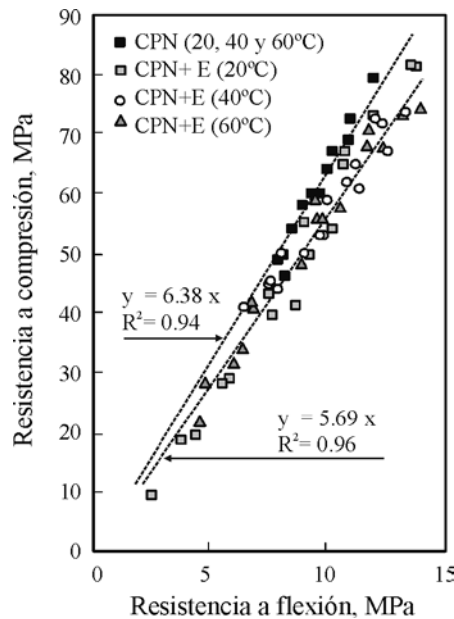


Figura 8: Relación entre la resistencia a compresión y flexión de las pastas estudiadas.

## 4 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pastas de cemento con contenidos variable de escoria curadas a diferentes temperaturas se puede concluir que:

A temprana edad, la activación térmica de la escoria permite obtener resistencias mecánicas similares a la registrada por la pasta CPN, empleando cementos con elevados contenidos de adición.

La incorporación de escoria al cemento produce un incremento en la relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión.

La temperatura de curado óptima del cemento con escoria para alcanzar una determinada evolución de la resistencia dependerá de las proporciones de cemento y escoria, considerando que a medida que aumente el contenido de adición se deberá incrementar la temperatura de curado del cemento mezcla.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo quieren agradecer a la empresa Loma Negra CIASA por la provisión de los materiales para realizar el estudio.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ZHANG C., WAN A., TANG M., LIU X., “The Filling Role of Pozzolanic Material”, *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 6, pp. 943-947, Jun. 1996.
- [2] BONAVETTI V.L., “Hormigón con elevado contenido de adiciones (Green Concrete)”, In: *Hormigones Especiales*, Editado por la Asociación Argentina de Tecnología del hormigón, pp. 97-142, 2004.

- [3] ISAIA G.C., GASTALDINI A.L.G., MORAES R., “Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 1, pp. 69-76, Jan. 2003.
- [4] ACI 233, “Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete”, In: ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, *Materials and General Properties of Concrete*, (1998).
- [5] ESCALANTE J.I., GÓMEZ L., OJAL K.K., MENDOZA G., MANCHA H., MÉNDEZ J., “Reactivity of blast-furnace slag in portland cement blends hydrated under different conditions”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 10, pp. 1403-1409, Oct. 2001.
- [6] ESCALANTE-GARCÍA J.I., SHARP J.H., “The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, pp. 695-702, May. 2001.
- [7] CAO Y., DETWILER R.J., “Backscattered Electron Imaging of cement pastes cured at elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 3, pp.627-638, Mar. 1995.
- [8] MIURA T., IWAKI I., “Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blast-furnace slag at low temperatures”, *ACI Materials Journal*, v. 97, n. 1, pp. 66-70, Jan.2000.
- [9] SWAMY N., PERAZZO BARBOSA N., “Desenvolvimento de concretos duráveis e resistentes através do uso de cinzas volantes e escória de alto forno moída”, In: Publicação técnica. LABEME. Centro de Tecnología da UFPB, João Pessoa, 1998.
- [10] BARNETT S.J., SOUTSOS M.N., MILLARD S.G., BUNGEY J.H., “Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies”, *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 3, pp. 434-440, Mar. 2006.
- [11] POWERS T.C., “The Non Evaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste”, In: ASTM Bulletin 158, pp. 68-75, 1949.
- [12] MONTGOMERY D., RUNGER G., “Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería”, Mc Graw Hill, México, pp.787, 1996.
- [13] MENÉNDEZ G., BONAVENTTI V.L., IRASSAR E.F., “Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag”, *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 1, pp. 61-67, Jan.2003.
- [14] CARRASCO M.F., MENÉNDEZ G., BONAVENTTI V.L., IRASSAR E.F., “Cementos a medida con material calcáreo y escoria granulada de alto horno: Optimización de la resistencia”, *Revista de la Construcción Escuela de Construcción Civil Pontificia Universidad Católica de Chile*, v. 4, n. 1, pp. 24-34, Enero. 2005.
- [15] MENÉNDEZ, G., BONAVENTTI, V.L., IRASSAR, E.F. “Concretos with ternary cements. Part I: Early stage and mechanical strength”, *Materiales de Construcción*, v. 56, n. 284, pp. 55-67, Oct.-Dic.2006.
- [16] NEVILLE A., Tecnología del Concreto, Editorial Limusa, México, 1981.
- [17] RAMLOCHAN T., THOMAS M.D.A., HOOTON R.D., “The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. Part II: Microstructural and microchemical investigations”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 8, pp. 1341-1356, Aug. 2004.
- [18] ESCALANTE-GARCÍA J.I., SHARP J.H., “The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements”, *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 8, pp. 967-976, Aug. 2004.