

CEMENTOS MEZCLAS: INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE ESCORIA

Claudia C. Castellano¹, Viviana L. Bonavetti¹ y Edgardo F. Irassar¹

RESUMEN

En este trabajo se estudia la influencia del tamaño de partículas de escoria (finura Blaine 460, 680 y 900 m²/kg) sobre la resistencia mecánica y el contenido de agua no evaporable de pastas de cemento con contenido variable de adición (20 a 80 %). Estos parámetros se correlacionan con los tiempos necesarios para alcanzar el 50 % de la reacción.

Los resultados obtenidos muestran que, a primeras edades, cuando la finura del clinker se mantiene constante, al aumentar la cantidad de partículas menores a 10 μm en la escoria, se incrementa la resistencia y el contenido de agua no evaporable y disminuye el tiempo para alcanzar el 50 % de la reacción. Así, se pueden obtener adecuadas resistencias iniciales en cementos con medio y elevado contenido de escoria a partir de la activación física de la adición.

A edades más avanzadas esta activación presenta un menor impacto sobre el comportamiento mecánico, pues puede alcanzarse una resistencia similar o mayor a la obtenida por la pasta de cemento sin adición con elevados contenidos de escoria de finura convencional (350 a 450 m²/kg).

Palabras claves: Cemento portland, escoria granulada de alto horno, resistencia mecánica, finura, agua no evaporable, t₅₀.

ABSTRACT

In this paper, the influence of the particle size of slag (Blaine fineness 460, 680 and 900 m²/kg) on the mechanical strength and the hydration degree measured as the non-evaporable water has been studied on cement pastes with variable addition content (20 to 80 %). Both parameters are correlated with the time required to achieve 50 % reaction.

For a given fineness and mineralogy of portland clinker, results show that the strength and the non-evaporable water content increase at early ages when increasing the amount of particles smaller than 10 μm in the slag, decreasing the time to achieve the 50 % of reaction. Then, an adequate early strength in blended cements with medium and high slag-content the slag can be obtained from the physical activation by grinding.

At later ages, the influence of particle size of slag on the mechanical strength decline significantly. Blended cements achieve similar or greater compressive strength than those obtained by the addition of cement with high slag content of conventional fineness (350 to 450 m²/kg).

Keywords: Portland cement, granulated blast furnace slag, mechanical strength, finesse, not evaporable water, t₅₀.

RESUMO

Neste trabalho, estudar a influência do tamanho das partículas de escória (Blaine finura 460, 680 e 900 m²/kg) na resistência mecânica e teor de água de cimento cola evaporável com a adição de conteúdo variável (20-80 %). Estes parâmetros estão correlacionados com os tempos de reação necessários para alcançar 50 %.

Os resultados mostram que, nas primeiras idades quando a finura do clínquer é mantida constante, o aumento da quantidade de partículas menores do que 10 μm na escória, aumenta a resistência e o teor de água evaporável, e diminui o tempo para atingir 50 % da reação. Assim, pode-se obter resistência inicial adequada em cimentos com teor de escória de média e alta da ativação física da adição. Em idades mais velhas esta ativação tem um menor impacto no comportamento mecânico, porque a resistência pode ser obtida igual ou maior do que a obtida pela adição de pasta de cimento com o teor de escória de alto de finura convencional (350 a 450 m²/kg)

Palavras chaves: Cimento portland, escoria granulada de alto forno, resistência mecânica, finura, água nao evaporável, t₅₀.

⁽¹⁾ Profesores Investigadores, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. E-mail: ccastellano@fio.unicen.edu.ar, vbonavet@fio.unicen.edu.ar, firassar@fio.unicen.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En trabajos previos (Menéndez *et al.*, 2007; Carrasco *et al.*, 2005) se ha determinado que el empleo de escoria granulada de alto horno en la formulación de cementos compuestos conduce a una menor velocidad de hidratación del sistema y a una disminución de las propiedades resistentes a temprana edad, a medida que aumenta el nivel medio de adición en el cemento (Sivasundaram *et al.*, 1992 y Malhotra, 1987). Pues, con la incorporación de escoria se producen tres efectos que, dependiendo de las proporciones de los materiales y de sus características físicas y químicas, varían su importancia en función del tiempo. Así, el efecto de dilución del cemento portland se encuentra presente durante toda la hidratación; el efecto de estimulación (aceleración en la reacción del clinker portland) es preponderante en las primeras edades de la misma y la reacción cementante, generalmente, se encuentra diferida en el tiempo. Las consecuencias negativas del efecto de dilución, tienden a ser compensadas en principio por el efecto de estimulación y posteriormente, por la actividad cementante. Sin embargo, el grado de compensación entre estos efectos depende fundamentalmente de la reactividad (morfología, mineralogía, tamaño) y de la cantidad de adición (Bonavetti, 2004).

Considerando que la hidratación inicial comienza sobre la superficie de las partículas de la escoria, el área superficial de la misma compone el material latente para reaccionar. De este modo la velocidad y el grado de hidratación que se podrá alcanzar dependerán, entre otras razones, de la superficie específica y la distribución de tamaño de partículas de escoria granulada de alto horno. Es decir, que si se controlan estos parámetros, pueden producirse especialmente a primeras edades, cementos mezclas con alto contenido de adición con propiedades similares o superiores a las obtenidas por el cemento portland (Malhotra y Hemmings, 1995)

En este sentido, Wang *et al.* (2005) han determinado la influencia fundamental que tiene la fracción de tamaño de 0-20 μm sobre la reactividad de la escoria y el desarrollo de resistencia a edades tempranas. Por su parte, Mehta (1999) destaca el rol preponderante que cumplen las partículas de tamaño menor a 10 μm en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a 45 μm contribuye a edades tardías; y las partículas que superan este tamaño no se hidratan completamente, aún bajo tiempos prolongados de curado.

Por lo tanto, pueden obtenerse importantes incrementos de la resistencia a partir de la activación física de la escoria. Así, en hormigones elaborados con 70 % de escoria, cuando se duplica su finura puede aumentarse la resistencia un 215 % a 7 días (Swamy y Bouikni, 1990), por lo que el aumento de la finura de la adición permite la obtención de hormigones de alta resistencia con elevado contenido de la adición (Bonavetti, 2004).

Otros autores (Carrasco *et al.*, 2005, Bougara *et al.*, 2009 y Hooton, 1987) también consideran que la resistencia a compresión de los cementos con escoria incrementa con el aumento de la finura de la adición. Por ejemplo, Niu *et al.* (2002) al analizar el efecto del empaquetamiento de cementos con contenidos de 20 a 70 % de escoria y finuras Blaine de 300-800 m^2/kg , concluyeron que a 3 días el grado de hidratación alcanzado por los morteros con escoria finura Blaine 800 m^2/kg es el doble que el obtenido por los morteros con menor finura y estos resultados se correlacionan linealmente con las resistencias a compresión obtenidas.

En el presente trabajo se evalúa la influencia de la distribución del tamaño de partículas de la finura de la escoria granulada de alto horno (finura Blaine 460, 680 y 900 m^2/kg) sobre las propiedades mecánicas y la hidratación, de pastas con contenido variable de escoria (20 a 80 %) y relación agua/material cementante (a/mc) de 0.40.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Cemento: Para la realización de los ensayos se utilizó un cemento portland (CPN) sin adiciones, con una composición mineralógica de 62 % de C_3S , 14 % de C_2S , 0 % de C_3A y 16 % de C_4AF , categoría resistente 50 (medida sobre pobretas ISO-RILEM) y una finura Blaine de 360 m^2/kg . En la Tabla 1 se muestra la composición química, mientras que las propiedades físicas se informan en la Tabla 2.

Adición mineral: La escoria granulada de alto horno (E) con una finura Blaine de 460 m^2/kg y un módulo químico ($C+M+A/S$) de 1.76 (IRAM 1667/90) fue clasificada como una escoria básica. El índice de actividad con cemento determinado a 7 y 28 días, según la norma ASTM 989/05, corresponde a una escoria de grado 100 y su análisis por difracción por Rayos X (DRX) mostró sólo una pequeña proporción de materiales cristalinos (melilita) en $2\theta = 30.0^\circ$ (d: 3.00), evidenciando el rápido enfriamiento al que fue sometida (Fig.1). En la Tabla 1 se muestra la composición química.

A esta escoria se le realizó una molienda adicional en el laboratorio para lograr las finuras de 680 y 900 m^2/kg . El procedimiento se realizó con un molino a bolas de laboratorio (ML-300 TECMAQ) de cámara plana (sin revestimiento) de diámetro de 285 mm y largo 330 mm, con un volumen de 20900 cm^3 . Los cuerpos molidores utilizados fueron bolas forjadas de acero al cromo-molibdeno de diámetro 15 mm ocupando un 46 % del volumen del molino. Esta molienda adicional se realizó durante

ocho horas en forma continua, sobre muestras de 1.5 kg de escoria granulada utilizando como agente dispersante trietanolamina al 0.03 % (Wan *et al.*, 2004). Las propiedades físicas de la escoria con diferentes finuras se informan en la Tabla 2.

Tabla 1: Composición química de los materiales.

Valores, %	Cemento Portland, CPN	Escoria granulada de alto horno, E
SiO ₂	20.98	34.07
Al ₂ O ₃	3.46	11.95
Fe ₂ O ₃	5.23	1.04
CaO	63.52	38.58
MgO	0.86	9.54
SO ₃	2.35	0.84
K ₂ O	0.95	0.41
Na ₂ O	0.09	0.15
Pérdida por calcinación	2.12	1.30

Tabla 2: Propiedades físicas de los materiales.

Propiedad	Cemento Portland, CPN	Escoria, E			
Densidad	3.10	2.95			
Finura Blaine, m ² /kg	360	460	680	900	
Contenido de partículas, %	< 10 μm	48	38	57	75
	Entre 10 y 45 μm	46	54	39	24
	> 45 μm	7	8	4	1
Parámetro de posición, x' (μm) ^a	14.50	19.87	13.51	7.15	
Parámetro de homogeneidad, n ^b	1.20	1.04	0.90	0.78	

^a Diámetro característico de la distribución de tamaños de partículas, obtenido a una masa acumulada de 63.2 %.

^b Pendiente de la curva de distribución del tamaño de las partículas que representa el ancho de la misma.

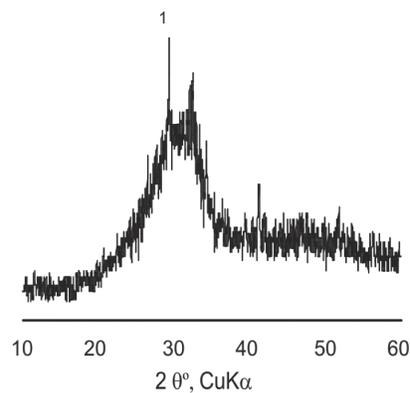


Fig. 1: Difractograma de la escoria granulada de alto horno, 1. Melilita.

Cementos mezclas estudiados: Los cementos con adiciones se obtuvieron por reemplazos variables de cemento *CPN* por escoria. Los contenidos estudiados fueron 20, 40, 60 y 80 %, definiendo así cementos mezclas con un rango de medio a alto contenido de adiciones. Las pastas de cemento mezcla se identifican con el término *CPN* más (+) el contenido de escoria incorporado. Adicionalmente se estudió la pasta elaborada con *CPN*.

Proporciones, moldeo y curado de las pastas: Con los cementos mezclas antes descriptos se elaboraron pastas con una relación *a/mc* de 0.40. Las pastas fueron colocadas en moldes prismáticos de sección cuadrada de 625 mm² y 300 mm de largo y compactadas en dos capas de 25 golpes cada una. Inmediatamente luego de ser terminadas, los moldes fueron cubiertos con un film plástico y se colocaron a 20 °C con una variación ± 1 °C.

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. Las edades de ensayo fueron 2, 7, 28 y 90 días.

Resistencia mecánica: La resistencia a compresión se evaluó sobre las probetas prismáticas, de sección transversal de 625 mm². Los resultados informados en la Tabla 3 corresponden al promedio de seis determinaciones por edad.

Tabla 3: Resistencia a compresión de las pastas.

Tipo de cemento	Resistencia a compresión, MPa											
	Finura Blaine 460 m ² /kg				Finura Blaine 680 m ² /kg				Finura Blaine 900 m ² /kg			
	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d
CPN+20E	39.5	54.5	73.1	81.3	42.2	63.8	77.3	81.6	46.3	66.3	79.9	83.5
CPN+40E	28.9	41.2	65.2	81.6	39.5	53.8	72.9	79.6	42.0	60.8	75.8	82.3
CPN+60E	18.4	28.4	56.5	67.2	29.2	49.0	69.4	75.6	39.9	57.5	74.4	81.0
CPN+80E	9.2	19.3	50.8	55.6	24.1	47.3	64.9	70.3	33.7	52.2	69.2	75.8

La resistencia a flexión se determinó sobre probetas prismáticas de con una sección de 625 mm² y 85 mm de largo. 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 4 corresponden al promedio de tres determinaciones por edad.

Tabla 4: Resistencia a flexión de las pastas.

Tipo de cemento	Resistencia a flexión, MPa											
	Finura Blaine 460 m ² /kg				Finura Blaine 680 m ² /kg				Finura Blaine 900 m ² /kg			
	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d
CPN+20E	7.6	10.3	11.9	12.6	8.2	11.0	12.7	13.2	9.8	12.9	13.2	13.9
CPN+40E	5.8	8.6	10.6	12.2	6.8	9.9	11.0	13.9	8.2	10.9	13.4	14.5
CPN+60E	3.8	5.5	9.0	10.8	5.2	8.5	10.8	12.3	6.9	9.2	11.9	13.0
CPN+80E	3.5	5.4	8.9	10.5	4.3	6.9	9.2	11.3	6.2	8.3	10.0	12.1

Agua no evaporable: Para estimar el progreso de la hidratación se analizó el contenido de agua no evaporable (*W_n*) de acuerdo al procedimiento propuesto por Powers (1949). Este parámetro se determinó como la diferencia entre el peso de la muestra seca a 105 °C (*P₁₀₅*), el peso a 950 °C (*P₉₅₀*) y el peso de las pérdidas por calcinación del cemento (*P_{xCPN}*) y la escoria (*P_{xE}*) en los porcentajes correspondientes, todos ellos referidos a la cantidad de material cementante (*mc*)

presente en la muestra. En este último término se asumió que la totalidad de la escoria reacciona para producir silicato de calcio hidratado (CSH):

$$Wn = \frac{P_{105} - P_{950} - (PxCPN + Px E)}{mc} \quad (1)$$

Determinación del tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción: Este parámetro se determinó empleando la ecuación sugerida por Knudsen (1980), donde la resistencia y la edad de los cementos curados a una determinada temperatura, pueden relacionarse por medio de la ecuación hiperbólica 2:

$$S = \frac{S_u K_r (t - t_0)}{I + K_r (t - t_0)} \quad (2)$$

S es la resistencia al tiempo t , S_u es la resistencia última, K_r es la constante de la reacción ($K_r = 1/t_{50}$), t_{50} es el tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción y t_0 es el tiempo inicial de desarrollo de resistencia.

Los parámetros S_u y K_r fueron obtenidos por análisis de regresión utilizando el software DATAFIT, empleando como valor de t_0 el tiempo final de fraguado de cada pasta. El desarrollo de la hidratación de las muestras se evaluó a partir de la determinación de t_{50} que es el recíproco de la constante K_r .

Diseño de experimentos: Con el fin de evaluar el contenido de escoria y su finura como un sistema de variables interrelacionadas se adoptó un diseño de experimentos, donde las dos variables experimentales son el contenido de escoria (X_1) y la finura de la escoria (X_2).

El empleo de un diseño de experimentos permite predecir la respuesta de otros puntos experimentales, que si bien pertenecen al dominio estudiado, no forman parte de las pastas que necesariamente deben realizarse para obtener la modelación. La Fig. 2 muestra el dominio definido por los puntos experimentales (•) que conforman el diseño adoptado para cada cemento estudiado.

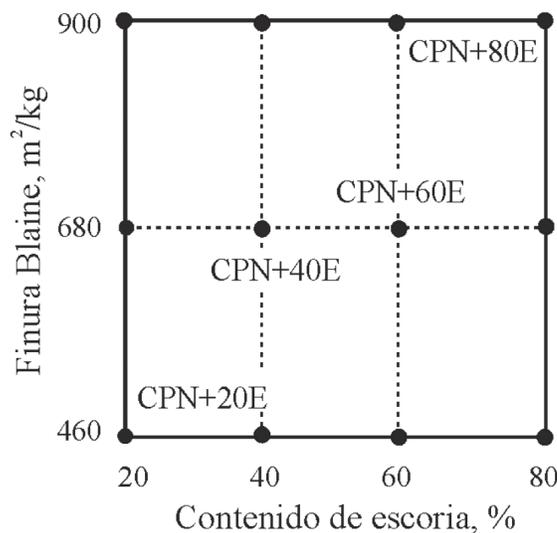


Fig. 2: Dominio de los cementos con adiciones estudiados.

La utilización de finuras tan elevadas como 900 m²/kg quedó definida por el propio dominio del sistema de experimentos seleccionado, sin desconocer que alcanzar estas finuras en la práctica ocasiona serios inconvenientes de índole tecnológicos, económicos y ambientales.

A partir de este sistema (Montgomery y Runger, 1996), la resistencia a compresión y a flexión se determinó por el análisis de las superficies de respuesta. La ecuación del modelo está dada por la ecuación 3:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (3)$$

donde, Y : es la resistencia a compresión o a flexión a una edad determinada, X_1 y X_2 : son las variables experimentales y β_0, \dots, β_5 : son los coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados que se informan en la Tabla 5.

Tabla 5: Coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados, R^2 y $Prob > F$

Edad, días	Coeficientes resistencia a compresión						R^2	$Prob > F$
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
2	27.3	-0.64	0.06	-1.24*	-0.04*	0.60*	0.98	0.0001
7	8.97	-1.20	0.19	3.66*	0.13*	0.06*	0.98	0.0001
28	51.9	-0.30	0.07	-1.71*	-0.04*	0.22*	0.98	0.0001
90	86.0	-0.37	4.30*	-4.01*	-0.02*	0.76*	0.94	0.0010

Edad, días	Coeficientes resistencia a flexión						R^2	$Prob > F$
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
2	10.9	-0.144	-5.40*	0.61*	0.007*	-0.003*	0.99	0.0001
7	8.3	-1.135	0.01	-0.44*	0.004*	0.019*	0.97	0.0003
28	12.1	-0.039	-0.75*	-0.15*	0.0397*	-0.0006*	0.93	0.0024
90	8.6	0.023	9.76*	-0.67*	-0.044*	0.114*	0.91	0.0041

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

Todos los valores de $Prob > F$ (Test de Fisher) para las distintas edades estudiadas, fueron menores que 0.05 indicando que el modelo fue significativo y el coeficiente R^2 (Tabla 5) fue mayor a 0.91 mostrando una buena correlación entre los valores experimentales y calculados.

La máxima diferencia entre la resistencia a compresión experimental y calculada fue de ± 9.0 %, mientras que esta diferencia para la resistencia a flexión fue de ± 4.8 %.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Resistencia a compresión: La Fig. 3 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a compresión de las pastas estudiadas hasta la edad de 90 días. En todos los casos, se ha determinado el entorno de cada superficie de respuesta considerando que el mismo sea en el orden del 10 % de la máxima resistencia obtenida en el dominio estudiado a cada edad.

Los valores obtenidos por la pasta CPN a 2, 7, 28 y 90 días fueron 46.1, 57.0, 69.0 y 75.2 MPa, respectivamente. Con el objetivo de comparar el comportamiento de las pastas con distintos contenidos de escoria y finura con el obtenido por la pasta CPN, en cada una de las edades se ha superpuesto la curva de isorrespuesta correspondiente al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta CPN.

A 2 días (Fig. 3a) se puede observar que para una determinada finura, a medida que el contenido de escoria aumenta, se produce una disminución de la resistencia. Sin embargo; cuando la finura de la escoria se incrementa, las curvas de isorrespuestas tienden a estar más separadas entre sí, generándose menores disminuciones de la resistencia con el incremento de la variable X_1 . Esto es, para la finura de 460 m^2/kg el incremento en el contenido de escoria de 20 (39.5 MPa) a 80 % (9.2 MPa) produce una disminución de la resistencia en el orden del 77 %; mientras que para la finura de 900 m^2/kg sólo resultan ser de 27 %. Además, con valores de $X_2 > 500$ m^2/kg es posible alcanzar una resistencia similar a la registrada por la pasta CPN con valores de $20\% < X_1 < 45$ %.

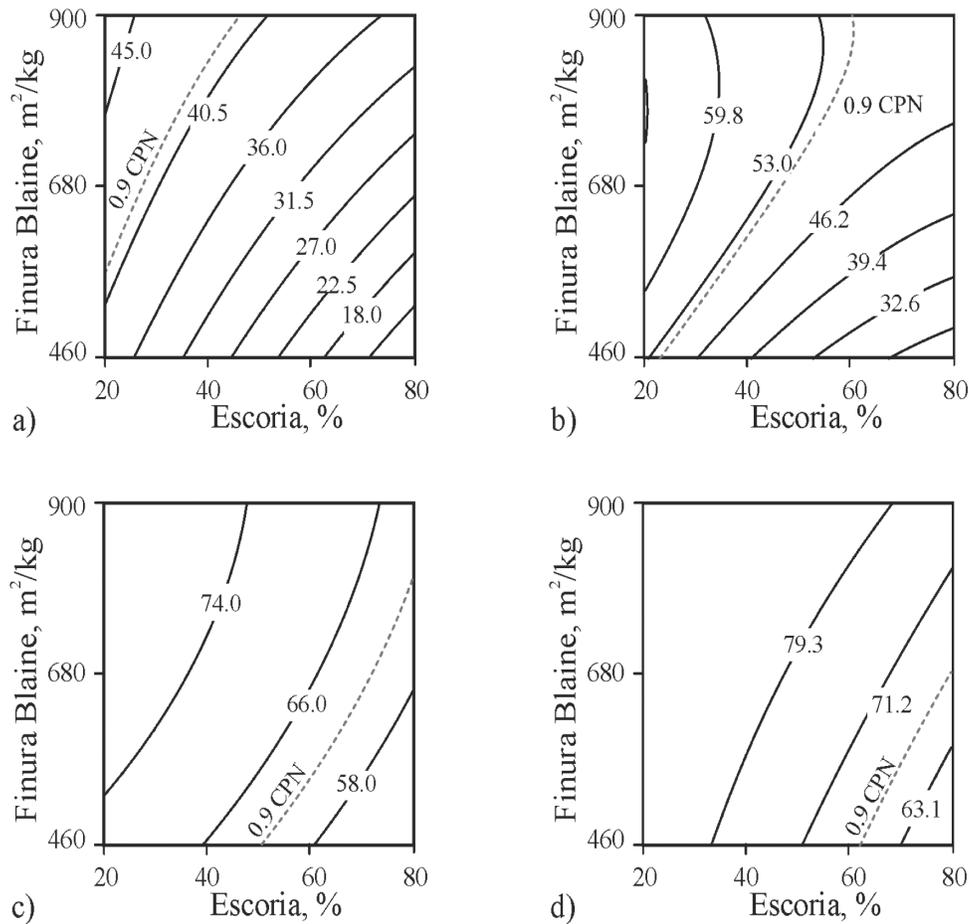


Fig. 3: Curvas de isorrespuestas de la resistencia a compresión (en MPa) de las pastas. a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días y d) 90 días.

A 7 días (Fig. 3b), las pastas elaboradas con escorias con una finura de 460 m²/kg presentan un comportamiento similar al registrado a 2 días, pues cuando la variable X_1 se incrementa de 20 (54.5 MPa) a 80 (19.3 MPa) se registran disminuciones de la resistencia del orden del 65 %. No obstante, para valores de $X_1 < 50$ % y $X_2 > 680$ m²/kg, las curvas de isorrespuestas resultan independiente de la variable X_2 , mientras que para valores de $X_1 > 60$ % prácticamente toda la zona del dominio alcanza un nivel de resistencia similar (zona delimitada por las curvas 46.2-53.0 MPa). Aún así, la zona de máxima resistencia (>59.8 MPa) queda definida por valores de 20 % < X_1 < 30 % y 500 m²/kg < X_2 < 900 m²/kg.

Por último, para alcanzar una resistencia similar a la registrada por la pasta CPN existe una mayor combinación de variables que a la edad de 2 días, pues puede lograrse con valores de $X_1 = 22$ % y $X_2 = 460$ m²/kg hasta $X_1 = 55$ % y $X_2 = 900$ m²/kg.

A 28 y 90 días (Fig. 3c y d), las curvas de isorrespuestas se encuentran más separadas entre sí indicando una menor dependencia entre el contenido de escoria y la finura para alcanzar un determinado nivel resistente, aún así las zonas de máximas resistencias se encuentran definidas de acuerdo a los valores que adoptan las variables, esto es: bajos valores X_2 requieren bajos valores de X_1 y altos valores de X_2 permiten altos valores de X_1 .

Finalmente, a 90 días la mayor parte del dominio estudiado registra una resistencia similar o superior a la registrada por la pasta CPN.

Resistencia a flexión: La Fig. 4 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a flexión de las pastas estudiadas. Los valores obtenidos por la pasta CPN a 2, 7, 28 y 90 días fueron 8.2, 9.7, 10.9 y 12.0 MPa, respectivamente. Con

el objetivo de comparar el comportamiento de las pastas con distintos contenidos de escoria y finura con el obtenido por la pasta CPN, en cada una de las edades se ha superpuesto la curva de isorrespuesta correspondiente al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta CPN.

A 2 días (Fig. 4a), el comportamiento de las pastas frente a la resistencia a flexión es similar al registrado frente a la resistencia a compresión, pues para una finura dada el aumento en el contenido de escoria produce una disminución de la resistencia a flexión. Aún así, una resistencia similar a la registrada por la pasta CPN puede alcanzarse con valores de $X_1 < 27\%$ y $X_2 = 460 \text{ m}^2/\text{kg}$ o $X_1 < 60\%$ y $X_2 = 900 \text{ m}^2/\text{kg}$.

A 7 días (Fig. 4b), para las finuras de 460 y 680 m^2/kg las disminuciones de resistencias que se producen cuando el valor de X_1 aumenta de 20 a 80 % son de aproximadamente 47 %, mientras que para $X_2 = 900 \text{ m}^2/\text{kg}$ la disminución de este parámetro resulta de 37 %. Además, a esta edad existe una mayor combinación de variables que permiten alcanzar una resistencia similar a la obtenida por la pasta CPN ($X_1 < 35\%$ y $X_2 = 460 \text{ m}^2/\text{kg}$ o $X_1 < 75\%$ y $X_2 = 900 \text{ m}^2/\text{kg}$).

A 28 días (Fig. 4c), las curvas de isorrespuestas se encuentran más separadas entre sí indicando una menor dependencia entre las variables; por ejemplo, la pasta CPN+40E registra una resistencia similar (zona delimitada por las curvas 10.3-11.7 MPa) cuando la variable X_2 adopta valores comprendidos entre 460 y 680 m^2/kg o la pasta CPN+80E alcanza una resistencia entre 8.9-10.3 MPa para valores de 600 $\text{m}^2/\text{kg} < X_2 < 850 \text{ m}^2/\text{kg}$.

A 90 días (Fig. 4d) se observa un comportamiento similar al registrado a los 28 días, registrándose las mayores resistencias para valores de $20\% < X_1 < 57\%$ y $680 \text{ m}^2/\text{kg} < X_2 < 900 \text{ m}^2/\text{kg}$. Aún así, prácticamente todo el dominio estudiado registra una resistencia similar o mayor a la alcanzada por la pasta CPN.

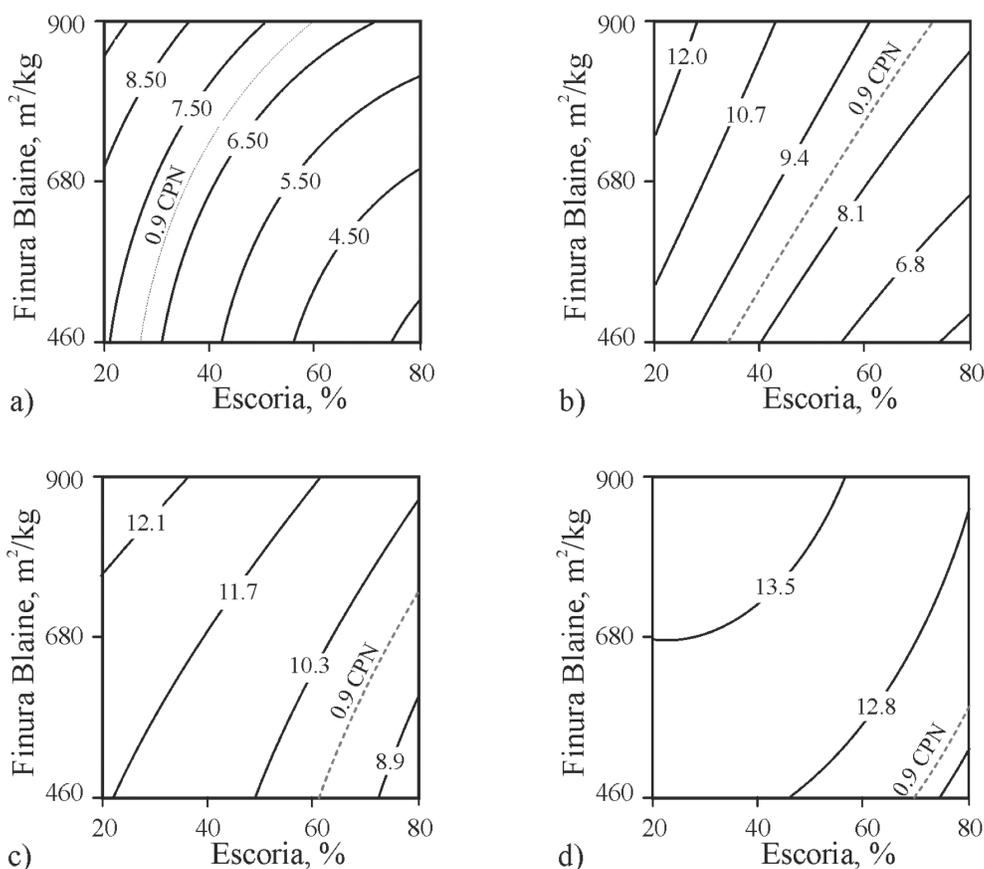


Fig. 4: Curvas de isorrespuestas de la resistencia a flexión (en MPa) de las pastas. a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días y d) 90 días.

Por último, la Tabla 6 muestra el contenido de escoria que se puede incorporar para obtener una resistencia igual o mayor al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta *CPN*. Para cumplir este requisito se puede observar que la cantidad de escoria aumenta con la edad y con la finura de la adición, y depende de la resistencia que se evalúa, pudiéndose incorporar mayor cantidad cuando se evalúa la resistencia a flexión que a compresión.

Tabla 6: Máximo contenido de escoria para alcanzar una resistencia similar o mayor a la registrada por la pasta *CPN*.

Contenido de escoria,	Resistencia a compresión			Resistencia a flexión		
	460 m ² /kg	680 m ² /kg	900 m ² /kg	460 m ² /kg	680 m ² /kg	900 m ² /kg
2 días	<20	26	45	26	35	59
7 días	22	48	60	35	53	73
28 días	50	72	80	61	76	80
90 días	62	80	80	70	80	80

Agua no evaporable: En la Fig. 5, puede observarse que los contenidos de agua no evaporable para todas las pastas *CPN+40E* se incrementan con el aumento de la finura, mostrando un comportamiento similar al registrado en la resistencia (Tablas 3 y 4). Esta tendencia se verifica para las pastas *CPN+80E* para todas las edades estudiadas.

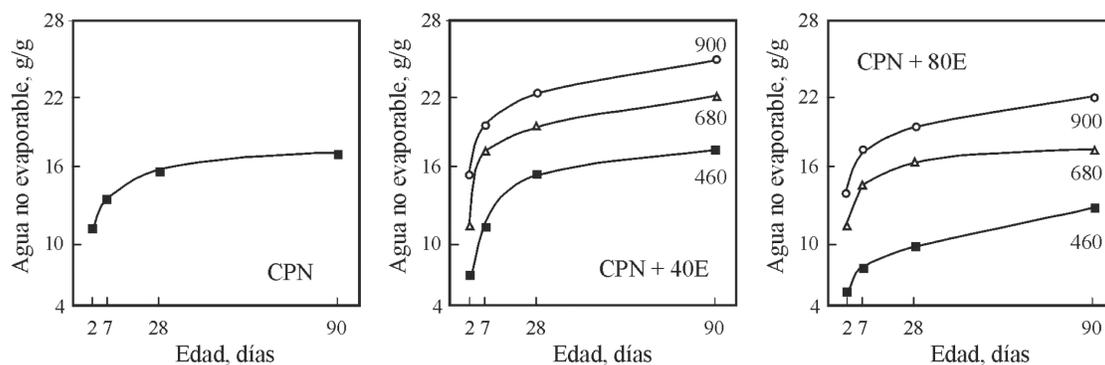


Fig. 5. Agua no evaporable de las pastas con distintas finuras Blaine. a) *CPN*, b) *CPN + 40E* y c) *CPN + 80E*.

A 2 días, las pastas con escoria finura Blaine 460 m²/kg presentan una disminución del contenido de agua no evaporable con respecto a la pasta *CPN*, siendo para las pastas *CPN+40E* y *CPN+80E* del 38 y 53 %, respectivamente. Este comportamiento es atribuido a que el efecto de dilución de los granos de cemento es preponderante dado que la escoria no ha reaccionado. A esta edad, las pastas con escoria finura Blaine 680 y 900 m²/kg registran incrementos de agua no evaporable con respecto a la pasta *CPN* del 7.2 y 33 %; y 7.8 y 29.8 % para las pastas *CPN+40E* y *CPN+80E*, respectivamente. Un comportamiento similar es registrado en las restantes edades por todas las pastas estudiadas.

Evaluación de los tiempos de reacción de las pastas: La Fig. 6 muestra el efecto de la finura Blaine de la escoria sobre el tiempo necesario para lograr el 50 % de la reacción (t_{50}) de las pastas de cementos con contenido variable de escoria.

En la misma se puede observar que, para una finura dada a medida que aumenta el contenido de escoria en la pasta se produce un incremento en el tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción, y este efecto es más importante a medida que disminuye la finura de la escoria. Así, para la finura de 460 m²/kg la pasta *CPN+80E* (482.4 horas) tiene un t_{50} 7.7 veces mayor que el registrado por la pasta *CPN* (62.8 horas), mientras que para la finura de 900 m²/kg este valor resulta 2.6 veces mayor. Por otra parte, para las finuras mayores a 680 m²/kg, las pastas *CPN+20E* alcanzan el 50 % de la reacción a menores tiempos que la pasta *CPN*.

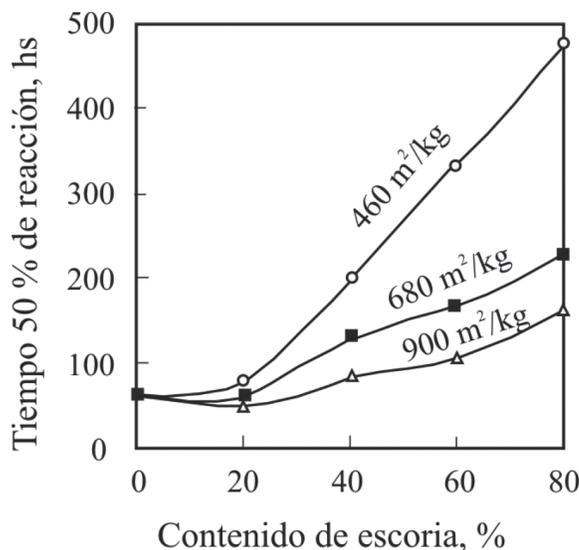


Fig. 6: Tiempo t_{50} de las pastas estudiadas.

Por último, para un determinado contenido de escoria el valor t_{50} crece considerablemente entre los obtenidos por las pastas con finura 460 m²/kg respecto a los registrados por las pastas con finura 900 ó 680 m²/kg. Por ejemplo, para la pasta CPN+40E los valores t_{50} resultan 203.4, 129.7 y 85.7 horas, respectivamente.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El mecanismo de hidratación de las adiciones minerales es un proceso controlado por difusión y disolución (Khatri y Sirivivatnanon, 1995), consecuentemente el tamaño de las partículas juegan un rol fundamental, pues las partículas relativamente grandes causan una lenta o incompleta hidratación.

De esta manera, cuando se reemplaza cemento por escoria granulada de alto horno y la composición y la finura del cemento portland se mantiene constante, la ganancia de resistencia a diferentes edades otorgada por la reacción de la adición dependerá de la distribución del tamaño de sus partículas. Como la escoria con finura Blaine de 460 m²/kg posee 62 % de partículas mayores que 10 μm y 8 % mayores a 45 μm (Tabla 2), su mayor aporte sobre la hidratación y la resistencia se producirá luego de los 7 días (Mehta, 1999).

Así, cuando la escoria presenta esta finura, sólo las pastas con bajos contenidos de adición (Tabla 6) pueden alcanzar una resistencia similar a la pasta CPN a muy temprana edad, pues la pasta CPN requiere 2.6 días (62.8 horas) para alcanzar el 50 % de la reacción, mientras que este valor para la pasta CPN+20E es 3.2 días (76.2 horas) (Fig. 6).

Este comportamiento puede ser atribuido mayoritariamente al efecto de estimulación, pues la incorporación al cemento de materiales finos provoca un incremento en la velocidad de reacción del clinker portland (Zhang *et al.*, 1996) que aumenta el grado de hidratación y produce un mayor volumen CSH. Este efecto compensa al efecto de dilución del cemento portland que ocasiona un aumento en la relación a/c efectiva (relación entre el contenido de agua y el material capaz de producir CSH), debido a la menor cantidad de material inicialmente reactivo (Menéndez *et al.*, 2007). A edades más avanzadas, el efecto de aceleración deja de ser relevante y la reacción de la escoria produce el refinamiento de granos y poros, permitiendo compensar al efecto de dilución. Por este motivo las pastas con hasta 60 a 70 % de escoria con finura Blaine de 460 m²/kg alcanzan o superan la resistencia obtenida por pasta CPN.

Las escorias con finura Blaine de 680 y 900 m²/kg poseen mucho menor cantidad (43 y 25 %) de partículas mayores que 10 μm y entre 4 y 1 % mayores a 45 μm , por lo que la ganancia de resistencia otorgada por la reacción de la adición se espera que ocurra desde las primeras edades de la hidratación (Mehta, 1999).

La aceleración en la reacción de la escoria, determinada a través del contenido de agua no evaporable, es corroborada por los valores de t_{50} obtenidos, pues antes de los 7 días (168 horas) las pastas con hasta 60 y 80 % de escoria alcanzan el 50 % de la hidratación, cuando la finura de la adición es de 680 y 900 m^2/kg , respectivamente (Fig. 6). Por lo tanto, a las primeras edades con el empleo de escorias con estas finuras, el nivel medio de adiciones aumenta considerablemente para alcanzar una resistencia similar a la registrada por la pasta CPN (Tabla 6). Este comportamiento es atribuido al efecto de estimulación de la hidratación del cemento portland y al aumento en la velocidad de reacción de la escoria dado por la mayor área superficial que constituye el material latente (Bonavetti, 2004). Adicionalmente, la estructura vítrea de la escoria está compuesta por enlaces del tipo iónico ($CaO-SiO_2$), del tipo predominante covalente ($Al_2O_3-SiO_2$) y covalente (SiO_2); siendo el enlace $CaO-SiO_2$ el más débil, con mayor reactividad y molturabilidad. Consecuentemente en las escorias más finas la concentración del enlace del tipo $CaO-SiO_2$ es predominante en su superficie, lo que genera una mayor reactividad de la escoria a primeras edades (Tsuyuki y Koizumi, 1999; Boldyrev *et al.*, 1996). Debido a este último efecto las disminuciones de resistencias registradas para los mayores contenidos de escoria incorporados con respecto a la pasta CPN resultan mucho menores.

Por último, en todas las pastas estudiadas el contenido de escoria que puede incorporarse resulta mayor para la resistencia a flexión que para la resistencia a compresión (Fig. 7), poniendo en evidencia que la incorporación de adiciones más finas produce una mejora más favorable sobre la resistencia a flexión que sobre la resistencia a compresión.

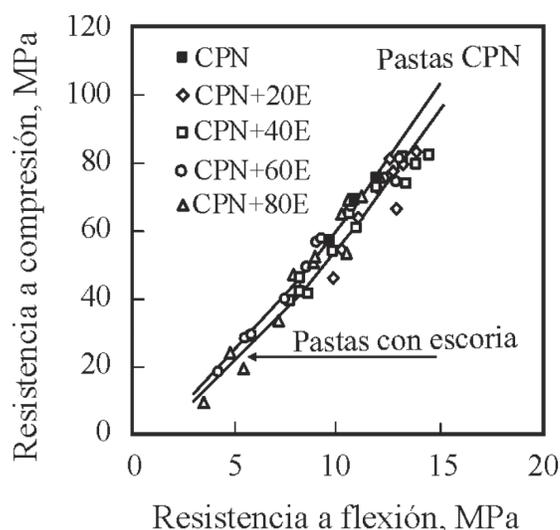


Fig. 7: Resistencia a flexión en función de la resistencia a compresión.

Este comportamiento es atribuido, por una parte al reemplazo de cristales grandes y orientados de hidróxido de calcio (CH), que conforman los planos de clivajes preferenciales por cristales pequeños y poco orientados (Giaccio *et al.*, 1991); y por otra, al aumento en la compacidad de la matriz dado por el refinamiento de poros (ACI 233, 1999).

CONCLUSIONES

El análisis de la influencia de la distribución de partículas de la escoria sobre el comportamiento de pastas de cemento con contenido variable de adición (20 a 80 %) permite concluir que:

Cuando se reemplaza cemento por escoria y la finura del clinker se mantiene constante, el desarrollo de la resistencia a diferentes edades otorgada por esta adición dependerá de la distribución de tamaño de sus partículas. Las partículas de tamaño menor a 10 μm cumplen un rol fundamental en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a 45 μm contribuyen a edades más avanzadas.

Los valores registrados de t_{50} y de agua no evaporable de los cementos estudiados, permiten confirmar el aumento de la reactividad de la escoria a primeras edades, generado por el incremento de su finura. De tal manera que, la pérdida

de resistencia inicial comúnmente ocasionada en los cementos por la incorporación de escoria con finuras convencionales (en el orden de los 350 a 450 m²/kg) puede ser compensada a partir de la activación física de la adición.

REFERENCIAS

ACI 233 (1999), "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete*, Michigan, USA.

Boldyrev, V.V., Pavlov, S.V., Goldberg, E.L. (1996), "Interrelation between fine grinding and mechanical activation", *International Journal of Mineral Processing*, Elsevier, Oxford, England, 44-45, pp. 181-18.

Bonavetti, V.L. (2004), "Hormigón con elevado contenido de adiciones (Green Concrete)", *Hormigones Especiales*, Editado por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina, pp. 97-142.

Bonavetti, V.L., Menéndez, G., Donza, H.A., Rahhal, V.F., Irassar, E.F. (2006), "Cementos compuestos conteniendo puzolana natural y escoria granulada de alto horno", *Materiales de Construcción*, Madrid, España, 56 (283), pp. 25-36.

Bougara, A., Lynsdale, C., Ezziane, K. (2009), "Activation of Algerian slag in mortars", *Construction and Building Materials*, Elsevier, Oxford, England, 23 (1), pp. 542-547.

Carrasco, M.F., Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E.F. (2005), "Strength Optimization of Tailor Made Cement with Limestone Filler and Blast Furnace Slag", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 35 (7), pp. 1324-1331.

Giaccio, G., Giovanbattista, A., Zerbino, R. (1991), "Propiedades de los hormigones elaborados con alto volumen de puzolanas naturales", *Revista Hormigón*, Buenos Aires, Argentina, 20, pp. 5-14.

Hooton, R.D. (1987), "The reactivity and hydration products of blast-furnace slag", *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. Malhotra V.M, Canadá, Chapter 4, pp. 291-333.

Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V. (1995), "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 25 (1), pp. 209-220.

Knudsen, T. (1980), "On Particle size distribution in cement hydration", *Proc. 7th Congress on the Chemistry of Cement*, París, France, II, pp. 170-175.

Niu, Q., Feng, N., Yang, J., Zheng, X. (2002), "Effect of superfine slag powder on cement properties", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 32 (4), pp. 615-621.

Malhotra, V.M. (1987), "Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag", *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. Malhotra V.M, Canadá, Chapter 5, pp. 291-333.

Malhotra, V.M, Hemmings, R. T. (1995), "Blended cements in North America-A review", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Oxford, England, 17 (1), pp.23-35.

Mehta, P.K. (1999), "Advancements in concrete technology", *Concrete International*, Michigan, USA, 21 (6), pp. 69-76.

Mehta, P.K. (1999), "Concrete technology for sustainable development", *Concrete International*, Michigan, USA, 21 (11), pp. 47-53.

Mehta, P.K. (1989), "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete-another look", *ACI SP 114*, Ed. Malhotra V.M, Noruega, Chapter 1, pp.1-43.

Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E. F. (2007), "Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte", *Materiales de Construcción*, Madrid, España, 57 (285), pp. 31-43.

Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E. F. (2003), "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Oxford, England, 25 (1), pp. 57-63.

Montgomery, D., Runger G. (1996), "Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería", Mc Graw Hill, México, pp. 787.

Powers T.C. (1949), "The non evaporable water content of hardened portland cement paste", *ASTM Bulletin 158*, Philadelphia, USA, pp. 68-75.

Sivasundaram, V., Malhotra, V.M., (1992), "Properties of Concrete incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Ground Granulated Slag", *ACI Materials Journal*, Michigan, USA, 89 (6), pp. 554-563.

Swamy, R.N. (1997), "Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete", *ACI SP 171*, Ed. Malhotra V.M, pp. 1-72.

Swamy, R.N., Bouikni, A. (1990), "Some Engineering Properties of Slag Concrete as Influenced by Mix Proportioning and Curing", *ACI Materials Journal*, Michigan, USA, 87 (3), pp. 210-220.

Tsuyuki, N., Koizumi, K. (1999), "Granularity and Surface Structure of Ground Granulated Blast Furnace Slag", *J.American of Ceramic Society*, Westerville, USA, 82 (8), pp. 2188-2192.

Wan, H., Shui, Z., Lin, Z. (2004), "Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 34 (1), pp. 133-137.

Wang, P.Z., Trettin, R., Rudert, V. (2005), "Effect of fineness and particle size distribution of granulated blast-furnace slag on the hydraulic reactivity in cement systems", *Advances in Cement Research*, Elsevier, Oxford, England, 17 (4), pp. 161-166.

Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Liu, X. (1996), "The filling role of pozzolanic material", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 26 (5), pp. 943-947.