



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Castellano, C.; Bonavetti, V.; Irassar, E.

Influencia del contenido de agua en la evolución de la hidratación de pastas de cemento con escoria

Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 1, abril, 2012, pp. 64-74

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127623090007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Influence of water content
on evolution of hydration
slag cement pastes*

Influencia del contenido de agua en la evolución de la hidratación de pastas de cemento con escoria



Autores

- CASTELLANO, C.** Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires,
ccastellano@fio.unicen.edu.ar
Buenos Aires, Argentina
- BONAVETTI, V.** Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires,
vbonavet@fio.unicen.edu.ar
Buenos Aires, Argentina
- IRASSAR, E.** Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
firassar@fio.unicen.edu.ar
Buenos Aires, Argentina

Fecha de recepción 01/11/2011

Fecha de aceptación 12/04/2012

Resumen

La evolución de la hidratación de las pastas de cemento con escoria granulada de alto horno depende de varios factores; entre ellos, las características de la adición (finura, composición y reactividad), de las proporciones de la mezcla (contenido de escoria, relación agua/material cementante, presencia de activadores alcalinos) y de las condiciones de curado (humedad y temperatura). Si se mantienen constantes las características de la escoria y las condiciones de curado, la cantidad de escoria que podrá hidratarse dependerá del contenido de agua disponible para su reacción.

En este trabajo se evalúa el efecto de la relación agua/material cementante (0.3, 0.4 y 0.5) sobre el mecanismo de hidratación y propiedades mecánicas, de pastas con contenido variable de escoria granulada de alto horno (0 a 80%) curadas a 20 °C. La influencia de cada variable en la resistencia mecánica a compresión fue determinada a partir del análisis de las superficies de respuesta resultantes del diseño de experimentos. La evolución de la hidratación se estudió a través del contenido de agua no evaporable y el cálculo de la cantidad de escoria reaccionada. Adicionalmente se detectaron los productos de hidratación por DRX.

Palabras clave: Escoria granulada de alto horno, relación a/mc, resistencia mecánica, escoria hidratada.

Abstract

The evolution of the hydration of cement pastes with granulated blast furnace slag depends on several factors including the characteristics of the addition (fineness, composition and reactivity) of the proportions of the mixture (slag content, w/b ratio, the presence of alkaline activators) and curing conditions (humidity and temperature). If remain constant characteristics of the slag and the curing conditions, the amount of slag hydration may depend on the content of water available for reaction.

This paper evaluated the effect of the w/b (0.3, 0.4 and 0.5) on the evolution hydration and mechanical properties in pastas with variable content of granulated slag, blast furnace (0-80%) cured at 20 ° C. The influence of individual variable on the compressive strength was determined from the analysis of the response surface central composite experimental design. The evolution hydration was evaluated through non evaporable water content and the amount of slag reacted. Complementary were detected by XRD hydration products.

Key words: Granulated blast furnace slag, water/binder ratio, mechanical strength, slag reacted.

1. Introducción

La evolución de la hidratación de pastas de cemento con escoria granulada de alto horno depende principalmente de la reactividad, el tipo, la finura, y la proporción de escoria; y de las características del cemento portland, la presencia de activadores alcalinos, la relación agua/material cementante (a/mc), y el tiempo y la temperatura de curado. Si las características físicas y químicas de la escoria se mantienen constantes, y las condiciones de curado no se modifican, la velocidad de reacción de la escoria decrece marcadamente con el incremento del porcentaje de reemplazo y con la disminución de la relación a/mc , efecto generado por la limitación del espacio disponible para alojar los productos de hidratación.

En este sentido, investigaciones efectuadas por Chidiac y Panesar [1] han determinado que la cantidad de agua no evaporable de pastas con contenidos variables de escoria y relaciones a/mc de 0,31 y 0,40, decrece sustancialmente con el incremento del contenido de escoria y la disminución de la relación a/mc . Este comportamiento puede ser atribuido a que con la disminución de la relación a/mc existe menos espacio disponible en la pasta para la disolución y precipitación de los productos de hidratación.

Resultados similares fueron informados por Lumley *et al.* [2], quienes han determinado que la cantidad de escoria reaccionada en pastas elaboradas con 8% de cemento, 92% de escoria y relación a/mc de 0,30 solo alcanzaba a los 2 años el 30%, mientras que este valor se incrementaba a 65% cuando el contenido de adición en la pasta era de 30% y la relación a/mc de 0.60. De esta manera, la relación a/mc modifica la hidratación desarrollada de pastas de cemento con contenidos variables de escoria.

Considerando que las partículas de escoria son generalmente menos reactivas que las partículas del cemento portland, en el inicio de la hidratación se produce un aumento de la relación a/c efectiva, definida como la relación entre el contenido de agua y el material capaz de producir CSH [3], generando un aumento en la porosidad y una disminución de la resistencia inicial de la pasta. Con el transcurso de la hidratación y la reacción de la adición se produce una matriz más densa y homogénea, densificando la microestructura y aumentando las propiedades mecánicas y durables de la pasta [4].

Sin embargo, la resistencia alcanzada por el hormigón elaborado con cemento con escoria también dependerá de la relación a/mc empleada, pues se ha registrado que este material presenta menores pérdidas

de resistencia que el hormigón de cemento portland sin adición frente al aumento de la relación a/mc [4]. Estudios realizados por Malhotra [5] en hormigones elaborados con 45 y 65% de escoria determinaron que la resistencia de los hormigones con escoria es particularmente menor en las primeras edades y esta tendencia es más marcada para relaciones a/mc bajas (0,30-0,38). No obstante, la resistencia de hormigones con alta relación a/mc (0,56) a edades avanzadas, alcanza o excede la resistencia del hormigón con cemento portland sin adición, mientras que la resistencia del hormigón con escoria y baja relación a/mc , independiente de la edad resulta menor que la obtenida por el hormigón sin adición. Este comportamiento muestra que la resistencia resultante en un hormigón con escoria dependerá de la relación a/mc , pues durante la reacción del cemento portland y la escoria se requiere mayor espacio disponible para alojar los productos de hidratación [6].

En el presente trabajo se evalúa la influencia de la relación a/mc sobre la evolución de la hidratación y las propiedades mecánicas, de pastas con contenido variable de escoria granulada de alto horno (0 a 80%) y distintas relaciones a/mc (0.30, 0,40 y 0.50), siendo las mismas curadas a 20 °C.

2. Parte experimental

Cemento: En esta investigación se utilizó un cemento portland sin adiciones (CPN, IRAM 50000), con una composición mineralógica de 62% de C_3S , 14% de C_2S , 0% de C_3A y 16% de C_4AF , categoría resistente CP50 y una finura Blaine de 360 m^2/kg . La composición química y las propiedades físicas de este material se muestran en la Tabla 1.

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^2/kg . Su análisis por DRX mostró solo una pequeña proporción de materiales cristalinos (melilita) en $2\Theta = 30,0^\circ$ (d : 3.00). La composición química y las propiedades físicas se informan en la Tabla 1.

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 que se identificaron con el término CPN más (+) el contenido de escoria incorporado.

Proporciones de las mezclas: Con los cementos mezclas previamente definidos se elaboraron las pastas con relaciones a/mc de 0.30, 0,40 y 0.50.

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas de los materiales

	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
Densidad	3,10	2,95
Retenido sobre tamiz, %		
75 µm (#200)	0,30	0
45 µm (#325)	0,11	0,9
Parámetro de posición, x' (µm) ^a	14,50	19,87
Parámetro de homogeneidad, n^b	1,20	1,04

^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.

Moldeo y curado de las pastas: Las pastas fueron colocadas en moldes de 25 x 25 x 300 mm y compactadas en dos capas de 25 golpes cada una. Inmediatamente después, los moldes fueron cubiertos con un film plástico y se colocaron a la temperatura de curado de 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 a esa temperatura, con agua saturada con cal en el caso de las pastas con CPN y solo con agua en el caso de las pastas con escoria, hasta las edades de ensayo que fueron 2,7, 28 y 90 días. El volumen de agua de curado se mantuvo comprendido entre 3,5 y 4,0 veces el volumen de las probetas.

Resistencia mecánica: La resistencia a compresión 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 con una variación menor a ± 10 % del valor medio.

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 [7], determinándose como la diferencia entre el peso de la muestra seca a 105 °C (P_{105}), el peso a 950 °C (P_{950}) y el peso de las pérdidas por calcinación del cemento (P_xCPN) y la escoria (PxE) 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 CSH. (Ecuación 1).

$$Wn = \frac{P_{105} - P_{950} - (PxCPN + PxE)}{mc}$$

Difracción de Rayos X (DRX): Las determinaciones se realizaron con un difractómetro Philips X'Pert equipado con monocromador de grafito, usando radiación CuKa, y operando a 40 kV y 20 mA. El registro se realizó a una velocidad de 2°/min y el intervalo de paso fue de 0,02.

Contenido de escoria hidratada: La determinación de este parámetro se efectuó empleando el modelo de hidratación de cementos con escoria propuesto por Chen *et al.* [8], en el cual se consideran que; la cantidad de agua necesaria para hidratar completamente un gramo de cemento portland, es de 0,185 gramos [9]; mientras que este valor para hidratar un gramo de escoria es de, 0,203 gramos [10]; y que los productos sólidos de hidratación considerados para el cálculo del modelo son conformes con los productos de hidratación obtenidos por DRX en la pastas estudiadas. De esta manera, a partir de este modelo fue posible también estimar los volúmenes de las distintas fases de las pastas hidratadas a 90 días.

Tabla 2. Resistencia a compresión de las pastas

Tipo de cemento	Resistencia a compresión, MPa											
	a/mc = 0,30				a/mc = 0,40				a/mc = 0,50			
	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28 d	90d	2d	7d	28 d	90 d
CPN	60,67	69,30	87,33	95,18	46,14	56,95	69,00	75,22	19,98	47,65	60,14	64,93
CPN+20	52,42	65,33	91,74	95,44	39,52	54,48	73,09	81,31	19,07	44,66	60,80	69,60
CPN+40	37,02	60,53	81,36	89,42	28,86	41,20	65,18	81,60	14,42	34,20	58,60	68,19
CPN+60	23,01	45,25	65,76	74,99	18,45	28,39	56,51	67,18	8,99	22,30	50,28	59,16
CPN+80	H,OI	33,62	64,51	72,64	9,20	19,30	50,83	55,60	4,99	16,26	43,65	49,86

Diseño de experimentos: Para el estudio de la influencia de la relación a/mc sobre la resistencia del cemento con escoria se adoptó un diseño de experimentos central compuesto centrado [11], en el cual las variables experimentales son el contenido de escoria (0 a 80%) y la relación a/mc (0,30, 0,40 y 0,50), las cuales se denominan X_1 y X_2 , respectivamente.

La Figura 1 muestra el dominio definido por los puntos experimentales (\bullet) del diseño adoptado. A partir de este sistema, la resistencia a compresión se determinó por el análisis de las superficies de respuesta. La ecuación del modelo está dada por la Ecuación 2:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2$$

donde, Y : es la resistencia a compresión 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 3. El coeficiente R^2 fue mayor a 0,96 indicando una buena correlación entre los valores experimentales y calculados. La máxima diferencia entre la resistencia a compresión experimental y calculada fue de $\pm 7,2\%$.

3. Presentación de resultados

Resistencia a compresión: La Figura 2 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.

A 2 días (Figura 2a), puede observarse para cada relación a/mc la disminución de resistencia que se registra a medida que el contenido de escoria en el cemento mezcla se incrementa. Así, las pastas CPN+40E (37,02 MPa) y CPN+80E (11,01 MPa) con relación a/mc de 0,30 registran una disminución de este parámetro del

Figura 1. Dominio de los cementos con adiciones estudiados

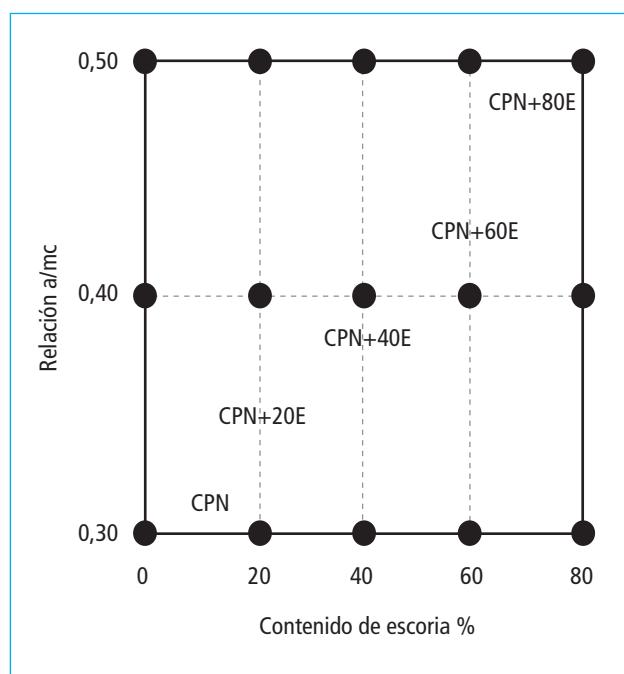
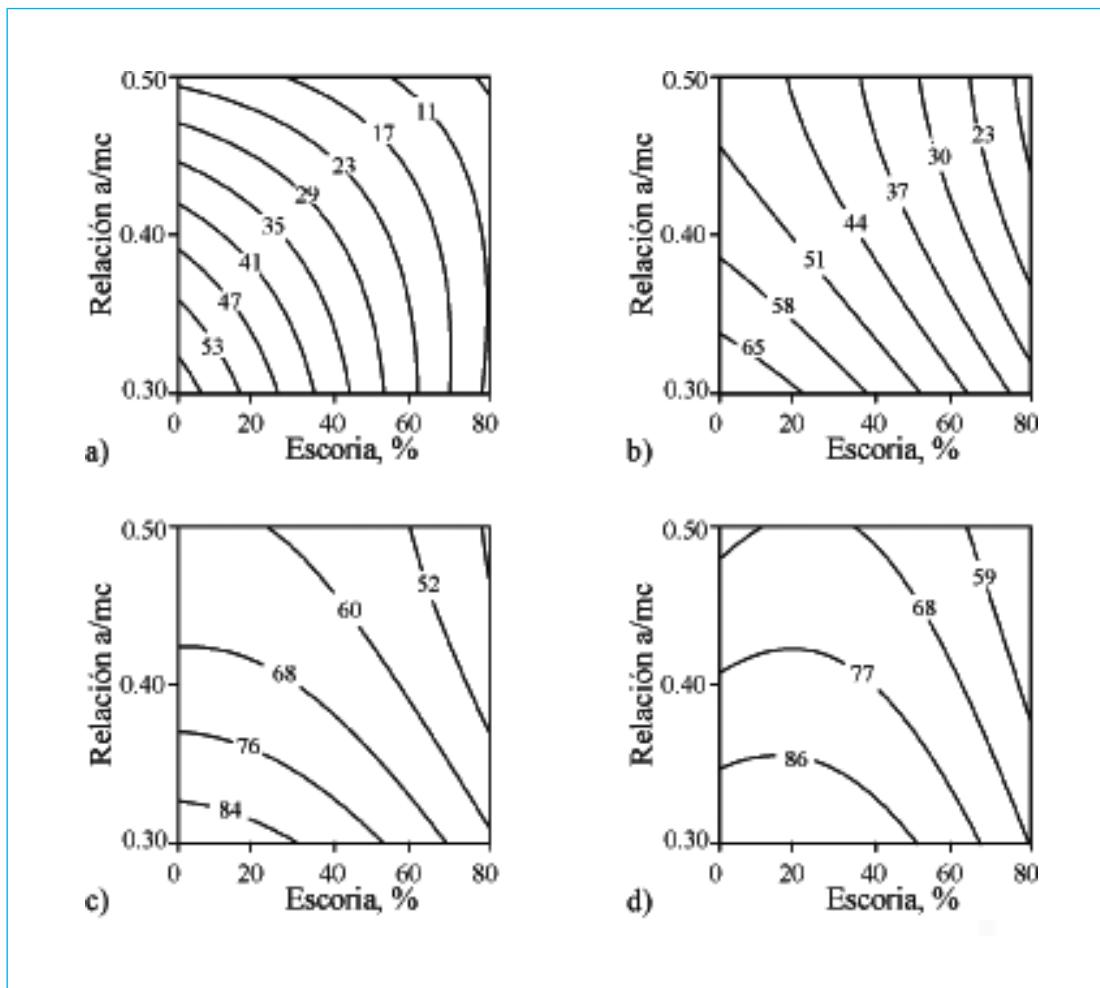


Tabla 3. Coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados y R^2

Edad, días	Coeficientes resistencia a compresión						R^2
	b	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	
2	74,9	-1,24	56,7	-1,08*	-327,6	2,22	0,99
7	166,4	-0,32	-434,2	-2,77*	397,5	0,20	0,98
28	185,4	-0,28	-424,9	-3,43*	349,5	0,70	0,96
90	162,6	-0,04	-281,6	-5,91*	175,9	0,62	0,96

(*) el número informado * 10^{-3} .

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



39 y 81% con respecto a la resistencia alcanzada por la pasta CPN (60,67 MPa).

Mientras que cuando la relación a/mc es de 0,50, las disminuciones son de 28 y 75% respectivamente. También puede observarse que para un determinado contenido de escoria a medida que la relación a/mc disminuye se produce un incremento en la resistencia de las pastas, y que este aumento se atenúa con el incremento del contenido de la adición. Así, las pastas con $X_1 < 40\%$ las curvas de isorespuestas se presentan más próximas entre sí, mientras que para las variables $0,30 < X_2 < 0,40$ y $X_1 > 40\%$ las mismas tienden a alinearse con respecto a la variable X_2 , indicando una menor influencia de la relación a/mc sobre la resistencia en esta zona del dominio estudiado.

Por último, la pasta CPN+20E presenta un incremento de la resistencia del 175% (52,42 y 19,07 MPa) entre la máxima y mínima relación a/mc , mientras que las pastas CPN+40E y CPN+80E registran un aumento del 157 (37,02 y 14,42 MPa) y 120% (11,01 y 4,99 MPa), respectivamente.

A 7 días (Figura 2b), las disminuciones de resistencia que ocasiona la incorporación de escoria para las distintas relaciones a/mc son menores a las registradas a 2 días. Así, la pasta CPN+40E con relación a/mc de 0,30 (60,53 MPa) presenta una disminución de resistencia de 13% con respecto a la registrada por la pasta CPN (69,3 MPa), mientras que este valor para la pasta CPN+80E es 51% (33,62 MPa). Por otra parte, las superficies de isorespuestas presentan un cambio en la pendiente con respecto a las registradas a 2 días,

indicando que para un determinado contenido de adición se producen menores ganancias de resistencia a medida que la relación a/mc disminuye. De esta manera, la pasta CPN + 20E presentan un incremento de la resistencia de 146% (65,33 y 44,66 MPa) entre la máxima y mínima relación a/mc , mientras que este aumento para la pasta CPN + 80E es de 106% (33,62 y 16,26 MPa).

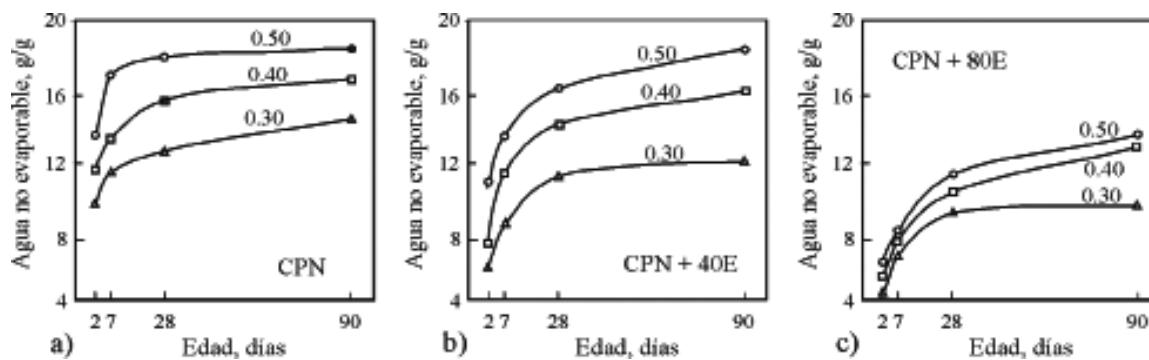
A 28 días (Figura 2c), para una relación a/mc determinada y valores de $X_1 < 40\%$, la resistencia alcanzada por las pastas es del mismo orden. De esta manera, la resistencia registrada de las pastas se encuentran entre 86 ± 5 , 70 ± 4 y 60 ± 2 MPa cuando la relación a/mc es de 0,30, 0,40 y 0,50, respectivamente.

A 90 días (Figura 2d), el comportamiento observado de la resistencia es similar al obtenido a 28 días. Para valores de $X_1 > 40\%$ y cualquier valor de variable X_2 , existe una mayor influencia de las variables sobre la resistencia a compresión alcanzada por las pastas.

Por último, analizando en su conjunto la Figura 2 puede observarse que las zonas delimitadas por cada superficie de respuesta es mayor a medida que aumenta la edad, es decir, que para alcanzar un determinado nivel resistente existen mayores combinaciones de valores de X_1 y X_2 posibles.

Agua no evaporable: La Figura 3 muestra la evolución del contenido de agua no evaporable de las pastas elaboradas con 0,40 y 80% de escoria y relación a/mc de 0,30, 0,40 y 0,50 a las edades estudiadas.

Figura 3. Agua no evaporable de las pastas a distintas temperaturas de curado. a) CPN, b) CPN + 40E y c) CPN + 80E



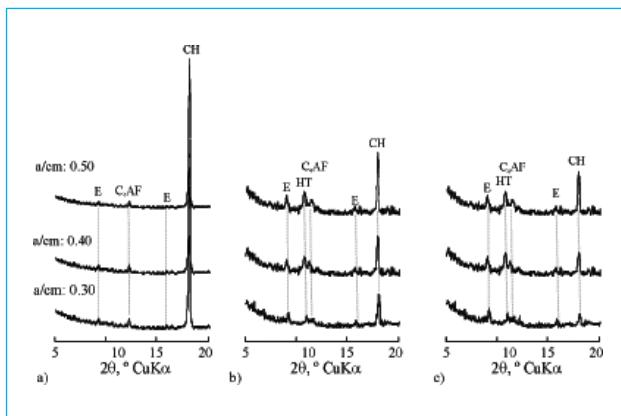
Fuente: Dominio de los cementos con adiciones estudiados.

Observando que la pasta CPN (Figura 3a) con diferentes relaciones a/mc , a todas las edades presenta un incremento de este parámetro con el aumento de la relación a/mc . Así, a 2 días las pastas con a/mc de 0,40 y 0,50 registran un contenido de agua no evaporable 20 y 41% mayor al obtenido en la pasta con relación a/mc de 0,30; mientras que estos valores a 90 días son de 16 y 28%, respectivamente.

La pasta CPN + 40E (Figura 3b), presenta para todas las edades estudiadas importantes aumentos en el contenido de agua no evaporable a medida que aumenta la relación a/mc , siendo los valores obtenidos por la pasta con relación a/mc de 0,50 entre 28 y 47% mayor a los registrado por la pasta con relación a/mc de 0,30, mientras que estos valores para la pasta con relación a/mc de 0,40 son entre 12 y 23% mayor. En tanto que estos aumentos para la pasta CPN + 80E (Figura 3c) resultan considerablemente menores. Así, el contenido de agua no evaporable para las pastas elaboradas con relación a/mc de 0,50 es entre 4 y 13% mayor a las registradas con la relación a/mc de 0,40, mientras que con respecto a las pastas con relación a/mc de 0,30 estos valores resultan entre 18 y 30% mayores. Por otra parte, cuando la relación a/mc es 0,40 ó 0,50 se produce un incremento de este parámetro en el orden del 20% entre los 28 y 90 días, mientras que los valores permanecen prácticamente constante cuando la relación a/mc es de 0,30.

Productos de hidratación por DRX: La Figura 4 muestra el DRX de las pastas CPN, CPN + 40E y CPN + 80E y relación a/mc 0,30, 0,40 y 0,50 correspondiente a 90 días.

Figura 4. DRX de las pastas con relación a/mc de 0,30, 0,40 y 0,50. a) Pasta CPN, b) Pasta CPN + 40E y c) Pasta CPN 80E



Fuente: Dominio de los cementos con adiciones estudiados.

En las pastas CPN los compuestos de hidratación detectados fueron: hidróxido de calcio (CH) y ettringita (E), en tanto que también se determinó la presencia de ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) procedente del cemento sin hidratar. Estos mismos compuestos fueron hallados en las pastas CPN + 40E y CPN + 80E en las que además se identificó una fase similar a la hidrotalcita (HT) [12,13], propia de la hidratación de la escoria.

4. Discusión de los resultados

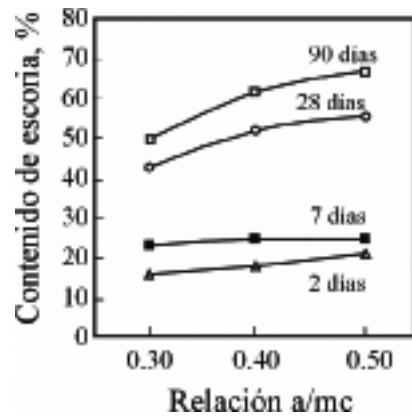
Investigaciones desarrolladas previamente [14,15] han demostrado que para una temperatura de curado de 20 °C la incorporación de escoria al cemento produce un aumento en el contenido de agua no evaporable en las primeras edades, debido al efecto filler; y en las edades más avanzadas dado por la hidratación de la adición.

Sin embargo, para elevados contenidos de escoria, el efecto físico no puede compensar completamente el efecto de dilución del mismo producido por la menor cantidad de material inicialmente reactivo, y genera un aumento en la relación a/c efectiva y una disminución en el contenido de agua no evaporable [16], que ocasiona las importantes disminuciones de resistencias observadas a 2 días (Figura 2a) para una determinada relación a/mc .

Los resultados obtenidos en el contenido de agua no evaporable permiten determinar que si bien las pastas de cemento con escoria granulada de alto horno muestran un paulatino incremento de la hidratación con la edad, su contribución es apreciable luego de los 7 días. La escoria reacciona generando productos de hidratación esencialmente similares a los obtenidos por el cemento portland [17] pero con menor contenido de CH (Figura 4) [18], produciendo el refinamiento de poros en la pasta de cemento y un aumento de la resistencia [3]. Así a edades más avanzadas, es posible para una determinada relación a/mc aumentar el contenido de escoria para alcanzar un nivel resistente dado.

La Figura 5 muestra el máximo contenido de escoria que se puede incorporar al cemento en función de cada una de las relaciones a/mc , para alcanzar una resistencia a compresión mayor al 90% de la registrada por la pasta CPN para cada una de las relaciones a/mc . Se puede observar que a medida que aumenta la edad se incrementa el contenido de escoria que se puede incorporar al cemento para alcanzar un determinado nivel resistente. Pero este contenido máximo también es función de la relación a/mc , pues a medida que este parámetro diminuye el contenido de escoria decrece. Este comportamiento puede atribuirse a que la hidratación de la escoria es menor con la disminución de

Figura 5. Contenido de escoria en función de la relación a/mc para alcanzar una resistencia mayor al 90% de la pasta CPN



Fuente: Dominio de los cements con adiciones estudiados.

la relación a/mc, siendo este efecto más pronunciado para relaciones a/mc menores a 0,40.

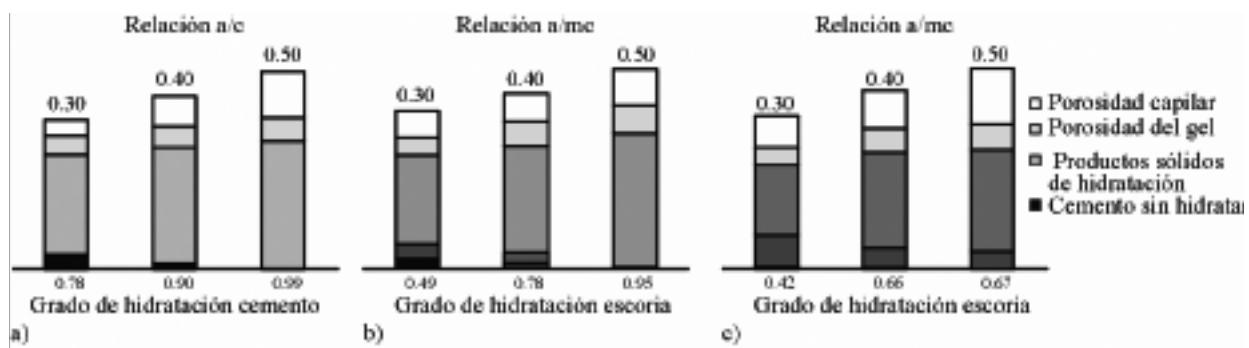
Por otra parte, la Tabla 4 muestra la cantidad de escoria que ha reaccionado a la edad de 90 días, calculada aplicando el modelo de Chen *et al.* [8]. En la misma se puede observar que con el aumento del contenido de escoria en el cemento se produce un incremento de la cantidad de escoria reaccionada para cada relación a/mc [19]. El grado de reacción de la escoria no solo depende de la relación a/mc, sino también del porcentaje de reemplazo de la adición [20]. Esto está ocasionado principalmente a la limitación del espacio disponible para la disolución y precipitación de los productos de hidratación [2], debido a que el CSH generado durante la hidratación de la escoria ocupa mayor volumen que el correspondiente al cemento portland sin adición [20] y no por la falta de CH dado que a 90 días aún existe CH en el sistema (Figura 4). Además, también se puede ver que para la pasta CPN + 40E, el contenido de escoria que ha reaccionado crece 1,8 veces cuando la relación a/mc aumenta de 0,30 a 0,50, mientras que este valor para la pasta CPN + 80E es de 1,6 veces.

También a partir del modelo de Chen *et al.* [8] fue posible estimar los volúmenes de las fases (Figura 6), de las pastas hidratadas a 90 días con 0, 40 y 80%

Tabla 4. Contenido de escoria que ha reaccionado a 90 días

Muestra	CPC+40E			CPC+80E		
	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50
Cantidad de escoria hidratada, %	20	31	36	36	50	58

Figura 6. Composición en volumen de las pastas a) CPN, b) CPN +40E y c) CPN +80E a 90 días



de escoria y relaciones a/mc de 0,30, 0,40 y 0,50. La Figura 6 muestra que para un mismo contenido de escoria, al incrementar la relación a/mc se incrementa el grado de hidratación de la escoria como también el volumen correspondiente a la porosidad capilar. Este resultado corrobora el comportamiento mecánico que se visualiza a través de las curvas de isorrespuestas a esta edad (Figura 2d); donde las resistencias son menores a medida que se incrementa el contenido de adición y aumenta la relación a/mc , debido a la mayor porosidad capilar del sistema. De esta manera, un aumento del grado de hidratación de las pastas con igual contenido de adición no necesariamente conducirá a un mejor comportamiento mecánico. Pues en estos casos, el comportamiento está gobernado en mayor medida por el espacio disponible para el desarrollo de los productos de hidratación y la porosidad resultante que por el grado de hidratación alcanzado.

5. Conclusiones

En función de los resultados obtenidos en pastas de cemento con contenido variable de escoria granulada de alto horno, se puede concluir que:

A 2 días, para alcanzar una resistencia similar a la obtenida por la pasta CPN en cada relación a/mc el contenido de escoria que se incorpore al cemento debe ser menor al 20%, pues para contenidos mayores el aumento en la relación a/c efectiva no puede ser compensado por el efecto filler producido por la adición.

A edades avanzadas, el contenido de escoria a incorporar para alcanzar un determinado nivel resistente es función de la relación a/mc , pues a medida que este parámetro disminuye, la cantidad de escoria que reacciona es menor debido a la limitación del espacio disponible para la disolución y precipitación de los productos de hidratación.

El aumento del grado de hidratación de las pastas con escoria que se produce cuando se incrementa la relación a/mc , no necesariamente conducirá a un mejor comportamiento mecánico de las mismas, pues en estos casos, este comportamiento está gobernado en mayor medida por la porosidad que por el grado de hidratación alcanzado.

Referencias

1. Chidiac S., D.Panesar D., "Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days", *Cement and Concrete Composites*, 30, (2), (2008), 63-71.
2. Lumley J. S., Gollop R. S., Moir G. K., Taylor H.F.W., "Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements", *Cement and Concrete Research*, 26, (1), (1996), 139-151.
3. Menéndez G., Bonavetti V.L., Irassar E.F., "Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte", *Materiales de Construcción*, 57, (285), (2007), 31-43.
4. ACI 233. "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, 1998.
5. Malhotra M., "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Ground, Granulated, Blast Furnace Slag. Supplementary Cementing Materials for Concrete". V.M. Malhotra, Canadá. Chapter 5, (1987), 291-333.
6. Escalante J.I., Gómez L., Ojal K.K., Mendoza G., Mancha H., J. Méndez., "Reactivity of blast-furnace slag in portland cement blends hydrated under different conditions", *Cement and Concrete Research*, 31, (10), (2001), 1403-1409.
7. T.C.Powers., "The non evaporable water content of hardened Portland cement paste". *ASTM Bulletin*, 158, 68-75, 1949.
8. Chen W., Brouwers H.J.H., "The hydration of slag, part 2: reaction models for blended cement", *Journal Material Science*, 42, (2007), 444-464.
9. Soroka I., "Portland Cement Paste and Concrete". Chemical Publishing Co Inc, New York, (1979), 30-32.
10. Chen W., Brouwers H.J.H., "The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag", *Journal Material Science*, 42, (2007), 428-443.
11. Montgomery D., Runger G., "Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería". Mc Graw Hill, México, (1996), 787.
12. 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*, 34, 8, (2004), 1341-1356.
13. Massazza F., Daimon M., "Chemistry of Hydration of Cements and Cementitious Systems", 9 Th ICCC, vol. I, 383-446, (1992), New Delhi, India.
14. Menéndez G., Bonavetti V.L., Irassar E.F., "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, 25, (1), (2003), 61-67.
15. Carrasco M.F., Menéndez G., Bonavetti 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. 4, (1), (2005), 24-34.
16. Menéndez G., Bonavetti V.L., Irassar E.F., "Concretes with ternary cements. Part I: Early stage and mechanical strength", *Materiales de Construcción*, 56, (284), (2006), 55-67.
17. Wu X., Jiang W., Daimon M., "Early Activation and Properties of Slag", *Cement and Concrete Research*, 28, (6), (1990), 961-974.
18. Narang K.C., "Portland and Blended Cement". 9 Th ICCC, vol. I, 213-257, (1992), New Delhi, India.
19. Battagin A.F., "Influence of degree of hydration of slag on slag cements", 9 Th ICCC, vol. I, 213-257, (1992), New Delhi, India.
20. Tang C.W., "Hydration properties of cement pastes containing high-volume mineral admixtures", *Computers and Concrete*, 7, (1), (2010), 17-38.