

SOLUCIONES TECNOLÓGICAS EN LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN LIGANTES CÁLCICOS

Jorge D. Sota
Centro de Investigaciones Viales – LEMaC
60 y 124 1900 La Plata – TE 4890413
Email jdsota@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN

Por muchos años en nuestro país las industrias base producen residuos que al acumularse generan contaminación.

Teniendo en cuenta las experiencias internacionales se analizaron algunos de ellos (escorias granuladas de alto horno (egah) y cenizas volantes (cv) de usinas térmicas) para su fijación en ligantes cálcicos (cales, cemento de albañilería y cementos portland).

Para ello se estudiaron las reacciones de hidratación y se realizaron ensayos específicos para evaluar los efectos de la adición y el progreso de características físico mecánicas en las mezclas en las que intervenían los ligantes compuestos.

Nuestra experiencia nos llevó no solo a lograr este objetivo sino que puso en evidencia las bondades de estos residuos para constituir ligantes cálcicos mas económicos y resolver problemas de durabilidad en hormigones de cemento portland con agregados reactivos.

En este trabajo se resumen las experiencias y se analizan los resultados de la utilización de estos residuos.

Palabras Clave: Residuos, cenizas, escoria, cementos, durabilidad

INTRODUCCION

La generación de residuos o subproductos en las industrias, teniendo en cuenta la preservación del medio ambiente obliga a considerar su utilización en otras industrias o su disposición a fin de evitar el efecto contaminante.

En nuestro país se generan en las industrias siderúrgicas y en las usinas termoeléctricas subproductos que durante años se arrojaron a bañados o se acumularon a granel en lugares a cielo abierto.

Por ser algunos de ellos productos pulverulentos o de pequeñas partículas, si se lo deja sobre el terreno, además de invalidar el uso del suelo, es fácilmente transportado por el viento, aún a baja velocidad, o al contaminar los cursos de agua o napas aumenta el deterioro ambiental.

Entre ellos se encuentran fundamentalmente la escoria granulada de alto horno (origina en la fundición del arrabio) y las cenizas volantes (originada en la quema del carbón como combustible).

En el caso de la escoria granulada de alto horno se obtiene con un enfriamiento rápido y es un material rico en calcio y muy activo.

Los carbones minerales quemados en las usinas térmicas son la generación de las cenizas volantes que dependiendo de las maquinas y el tipo de carbón empleado alcanzan en muchos casos hasta un 17 % del combustible empleado.

Estos subproductos constituían un inconveniente serio de contaminación y era necesario encontrarle una solución adecuada desde el punto de vista técnico-económico-ecológico.

Ella llego de la mano de las obras civiles, pudiendo usarse en las obras de albañilería, de hormigón, viales, etc..

Podemos resumir en este trabajo la utilización de las ceniza volante como adición a una cal y a un cemento de albañilería.

Siendo además su uso aplicado a inhibir o reducir la reacción álcali sílice al igual que la escoria granulada de alto horno, siendo este uso el mas aplicado con estos residuos industriales.

La RAS es una reacción que se produce entre los agregados reactivos y los álcalis del cemento y de otros orígenes (agregados, aditivos, medio ambiente, etc) en presencia de humedad.

En condiciones favorables estas reacciones químicas son expansivas deterioran las estructuras de hormigón, acortan la vida útil de las mismas en servicio y generalmente demandan inversiones -costosas para el mantenimiento, reparación y/o reemplazo de las estructuras.

Es habitual que la primera solución tecnológica sea la de evitar el uso del agregado reactivo, de no ser esto posible se utilizan materiales puzolanicos (cenizas volantes) o escorias granuladas de alto horno, microsílíce, etc. en reemplazo de una parte de cemento como una de las soluciones alternativas..

Para realizar los estudios es necesario aplicar métodos de ensayos acelerados confiables y que reproduzcan el comportamiento del hormigón en obra y evidencien la efectividad o no de la solución estudiada.

1.- USO DE CENIZAS VOLANTES EN UN CEMENTO DE ALBAÑILERÍA (1)

Se realizo su fabricación tomando como base la de un cemento de albañilería de mercado, que esta compuesto por una mezcla de clinker, caliza finamente molida, yeso y un aditivo incorporador de aire.

Teniendo en cuenta los ensayos preliminares se desarrollo el estudio sobre un ligante compuesto por ceniza volante, cemento pórtland, adición mineral modificada y aditivo incorporador de aire.

La inclusión de la adición mineral se realizó con el fin de conferirle a la mezcla capacidad de retener el agua de mezclado durante un tiempo prolongado.

Se realizaron mezclas con 40, 50 y 60 % de ceniza volante y se estudio la capacidad de las mismas de retener el agua, siendo muy baja esta capacidad. Por esta razón se uso la adición mineral, pero debe mencionarse que este material mejora la propiedad de la retención de agua pero puede provocar elevada contracción por la gran avides de agua que posee.

Finalmente se decidió por una mezcla de 50% de ceniza y contenidos de 1,2 y 3 % de adición mineral y aditivo incorporador de aire. Se trabajo con dos porcentajes de aire intencionalmente incorporado 17 y 22 %.

Cemento de albañilería 1 y 2 de mercado, Mezclas 17% y 25 % de aire intencionalmente incorporado con 50% de ceniza volante, para un porcentaje de adición mineral (2 %).

Los resultados nos indican la posibilidad de fabricar cementos de albañilería con la adición del 50% de ceniza volante con características similares a los que se comercializan en plaza.

Con las mezclas obtenidas se realizaron mezclas de asiento y revoques con muy buenos resultados.

Características de las cenizas volantes

P X C %	SO3 %	MgO %	SiO2 %	Fe2O3 %	Al2O3 %	CaO %	Na2O %	K2O %	Ret. T 0.075mm %	Blaine m2/g	P.e Kg/dm3
1.2	0.45	1.8	59.0	7.1	23.8	5.3	0.95	0.39	28	244	1.96
0.7	0.59	2.1	59.6	6.9	24.0	4.9	0.84	0.31	17	286	1.92

Resultados de los ensayos de caracterización de los
cementos de albañilería fabricados

Mezclas Ensayos	Cemento 1	Cemento 2	Mezcla 17%	Mezcla 24%	Limites de la Norma
Resistencia a compresión a los 7 días MPa	7.0	11.8	9.5	7.0	2.5
Resistencia a compresión a los 28 días MPa	8.0	13.2	15.4	11.8	4.5
Resistencia a compresión a los 90 días MPa	9.0	12.5	22.6	13.8	--
Retención de agua (%)	62.5	72.0	71.2	74.5	65
Estabilidad Volumétrica (%)	0.042	0.078	0.079	0.077	0.150

2.- USO DE CENIZAS VOLANTES EN CALES (2)

En este caso se tomaron como base cales aéreas, cálcicas y magnésicas para combinar las buenas propiedades de las cales aéreas conferidas a los morteros como la trabajabilidad y adicionar con el uso de la ceniza volante propiedades hidráulicas.

En este caso se usaron cenizas con dos diferentes finuras (la original del residuo y la de molienda en laboratorio).

La composición de las cenizas utilizadas es similar a las del caso anterior. Además se usaron cuatro cales tres de las llamadas aéreas y una hidráulica.

Las adiciones fueron en porcentajes de 25, 35 y 45 % peso en peso de la cal utilizada.

Se resumen los resultados del 35 % de adición realizado sobre las cales estudiadas con las dos finuras de ceniza volante.

Ceniza Volante Blaine 280 m²/g

	Cal 1	Mezcla 35 %	Cal 2	Mezcla 35 %	Cal 4	Mezcla 35 %	Cal 3	Mezcla 35 %
Resistencia (7 días) a compresión MPa	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	1.2	1.0
Resistencia (28 días) a compresión MPa	0.5	1.2	0.5	0.7	1.1	3.0	3.0	3.5
Resistencia (90 días) a compresión MPa	0.7	1.8	0.7	1.6	1.5	5.2	6.8	6.8
Retención de agua %	81.8	75.4	68.7	47.3	68.9	61.8	60.8	50.5

Ceniza Volante Blaine 400 m²/g

	Cal 1	Mezcla 35 %	Cal 2	Mezcla 35 %	Cal 4	Mezcla 35 %	Cal 3	Mezcla 35 %
Resistencia (7 días) a compresión MPa	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.6	1.2	1.4
Resistencia (28 días) a compresión MPa	0.5	1.6	0.5	1.0	1.1	3.5	3.0	4.2
Resistencia (90 días) a compresión MPa	0.7	3.3	0.7	3.1	1.5	5.2	6.8	9.1
Retención de agua %	81.8	79.0	68.7	52.7	68.9	50.4	60.8	61.8

Tomando como base cales aéreas y con una adición del 35 % de ceniza volante se obtienen cales hidráulicas de buena respuesta a las solicitudes de resistencia.

En caso de usar como base una cal hidráulica también se mejora la resistencia y esto es mas notable cuando usamos la ceniza volante con un proceso de molienda adicional.

En estos dos casos de uso de cenizas volantes se pueden hacer las siguientes consideraciones:

Utilizando cenizas volantes se pueden obtener materiales de construcciones ligantes de propiedades similares a los que se usan habitualmente en nuestro medio.

El costo final de estos productos debería ser menor al usar un desecho industrial, y disminuir como consecuencia de ello el consumo de energía para su fabricación.

Finalmente su uso implica disminuir la contaminación ambiental.

3.- USO DE CENIZAS VOLANTES Y ESCORIAS GRANULADAS DE ALTO HORNO EN CEMENTOS COMPUESTOS (3)

En estas experiencias se usaron una ceniza volante y una escoria de alto horno para modificar cementos de bajo y alto álcali frente a la posibilidad de usar agregados reactivos en el hormigón de cemento pórtland.

El uso de estos subproductos nos permiten resolver un problema de una manera técnico-económica muy beneficiosa.

Las características de los componentes del material aglomerante que se usaron en las distintas mezclas, ya sea el cemento (CAA, cemento alto álcali; CBA, cemento bajo álcali) como las adiciones minerales (CV, ceniza volante; E, escoria granulada de alto horno), se describen en la Tabla 1 (4, 5).

Tabla 1. Propiedades de los cementos y adiciones minerales empleados

Principales propiedades físicas	Cemento		Adición mineral	
	CAA	CBA	CV	E
Retenido sobre tamiz 75 μm (%)	4.4	12.4	5.0	14.6
Retenido sobre tamiz 45 μm (%)	--	--	7.0	34.0
Superficie específica Blaine (m^2/kg)	311	293	285	260
Resistencia a compresión a 7 días (MPa)	29.2	32.6	--	--
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	46.0	50.0	--	--
Pérdida por calcinación (%)	1.30	1.40	1.80	--
Trióxido de Azufre (SO_3) (%)	2.00	2.40	0.53	2.0
Oxido de Magnesio (MgO) (%)	3.60	2.30	2.06	4.0
Oxido de Hierro (Fe_2O_3) (%)	3.70	2.40	6.70	1.6
Oxido de Sílice (SiO_2) (%)	21.60	23.50	57.0	37.5
Oxido de Aluminio (Al_2O_3) (%)	6.20	2.70	24.60	12.0
Oxido de Calcio (CaO) (%)	58.00	64.80	3.50	41.0
Dióxido de Carbono (CO_2) (%)	--	--	--	--
Carbonato de Calcio (CO_3Ca) (%)	--	--	--	--
Oxido de Sodio (Na_2O) (%)	0.60	0.17	1.87	0.39
Oxido de Potasio (K_2O) (%)	0.82	0.19	0.41	0.78
Álcalis Totales (en Na_2Oe) (%)	1.14	0.29	2.13	0.90
Actividad Puzolánica con cal (kg/cm^2)	--	--	34	--

En la Tabla 2 se informan tipos de cemento y los agregados usados en cada mezcla estudiada y las proporciones de adiciones minerales activas.

Tabla 2. Composición de las mezclas de mortero u hormigón estudiadas

MEZCLA	CEMENTO	AGREGADO	ADICION	MEZCLA	CEMENTO	AGREGADO	ADICION
M1R	Alto álcali	Arena Silicea	-	M3R	Bajo álcali	Arena silicea	-
M2R	Alto álcali	Ortocuarcita	-	M4R	Bajo álcali	Ortocuarcita	-
M2E60	Alto álcali	Ortocuarcita	60% E	M4E60	Bajo álcali	Ortocuarcita	60% E
M2F20	Alto álcali	Ortocuarcita	20% F	M4F20	Bajo álcali	Ortocuarcita	20% F
M2CV20	Alto álcali	Ortocuarcita	20% CV	M4CV20	Bajo álcali	Ortocuarcita	20% CV
M2CV40	Alto álcali	Ortocuarcita	40% CV	M4CV40	Bajo álcali	Ortocuarcita	40% CV
M5R	Alto álcali	Migmatita	-	M6R	Bajo álcali	Migmatita	-
M5E60	Alto álcali	Migmatita	60% E	M6E60	Bajo álcali	Migmatita	60% E
M5F20	Alto álcali	Migmatita	20% F	M6F20	Bajo álcali	Migmatita	20% F
M5CV20	Alto álcali	Migmatita	20% CV	M6CV20	Bajo álcali	Migmatita	20% CV
M5CV40	Alto álcali	Migmatita	40% CV	M6CV40	Bajo álcali	Migmatita	40% CV
M7R	Alto álcali	R. Patagónico	-	M8R	Bajo álcali	R. Patagónico	-
M7E60	Alto álcali	R. Patagónico	60% E	M8E60	Bajo álcali	R. Patagónico	60% E
M7F20	Alto álcali	R. Patagónico	20% F	M8F20	Bajo álcali	R. Patagónico	20% F
M7CV20	Alto álcali	R. Patagónico	20% CV	M8CV20	Bajo álcali	R. Patagónico	20% CV
M7CV40	Alto álcali	R. Patagónico	40% CV	M8CV40	Bajo álcali	R. Patagónico	40% CV

Los morteros contienen dos tipos de cemento portland, uno de alto álcali ($\text{Na}_2\text{O} = 1.14\%$) y otro de bajo álcali ($\text{Na}_2\text{O} = 0.29\%$). Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1674. Complementariamente se observan las superficies y aspectos de cada barra.(6)

Los resultados obtenidos se graficaron en curvas y se agruparon según el agregado, el tipo de cemento y las adiciones utilizadas.

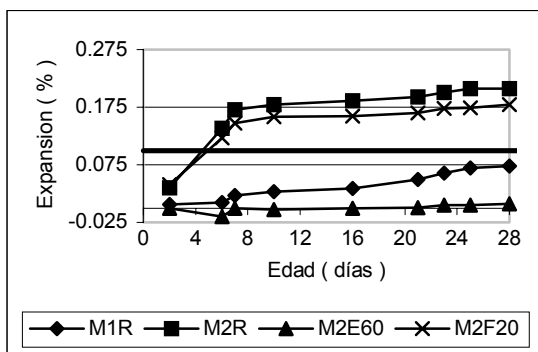


Gráfico 1

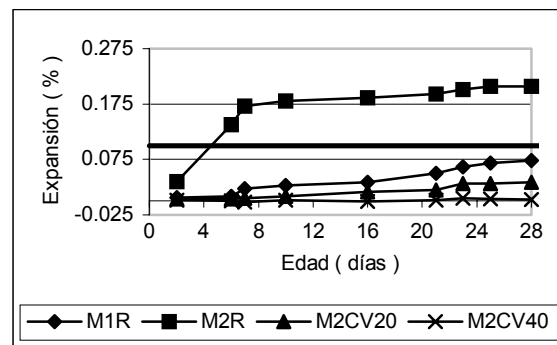


Gráfico 2

En estos gráficos se analizan los efectos de las adiciones utilizando un cemento de alto contenido equivalente de Na_2O . (1.14%) en una mezcla con un agregado reactivo (arenisca cementada con ópalo) (M2R) (expansión 0,175 % a los 16 días), manteniendo como patrón comparativo un agregado no reactivo (M1R).

En el gráfico 1 se observa que mientras la mezcla con la adición del 60% en peso de escoria granulada de alto horno (M2E60) disminuye fuertemente la expansión deletérea, la adición de filler produce una leve disminución de la expansión, probablemente por el efecto de dilución inicial, sin alcanzar efectos de inhibición.

El gráfico 2 muestra como las adiciones de ceniza volante 20% (M2CV20) y 40% (M2CV40), disminuyen apreciablemente las expansiones deletéreas y su acción es superior según el porcentaje creciente de adición.

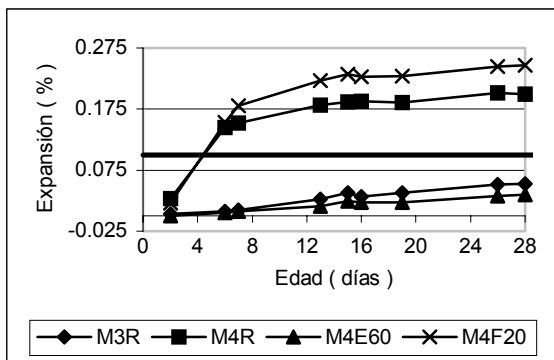


Gráfico 3

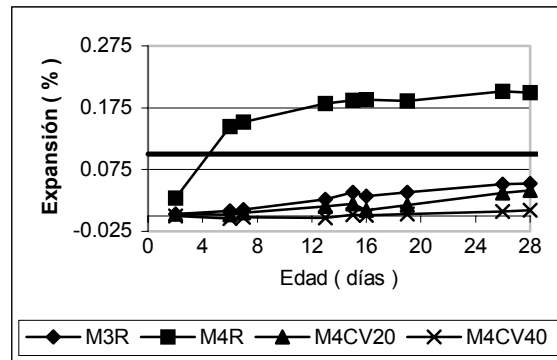


Gráfico 4

En los gráficos 3 y 4 se analizan los efectos de las adiciones minerales frente a un cemento de bajo contenido de álcali Na_2O . (0,29%) en una mezcla con un agregado reactivo (arenisca cementada con ópalo) (M4R), manteniendo como patrón comparativo un agregado no reactivo (M3R). Siendo el resto de los agregados los usados en las mezclas anteriores al igual que las adiciones.

Las consideraciones realizadas para el gráfico 3 son similares a las del gráfico 1 para la adición de escoria granulada de alto horno (M4E60), se observa en este caso que la adición de filler calcáreo (M4F20) aumenta la reactividad del conjunto y coloca al mismo por encima del límite máximo aconsejado por la norma para agregados reactivos (0.200%).

El gráfico 4 muestra un comportamiento similar de las cenizas volantes, siendo también en este caso apreciable la reducción de la expansión a medida que se incrementa el porcentaje de la adición, de ceniza volante 20% (M4CV20) y 40% (M4CV40).

Los gráficos 5 y 6 muestran los resultados obtenidos al utilizar en las mezclas un cemento de alto álcali y un agregado de reacción lenta, con cuarzo tensionado y deformado (M5R) (expansión 0.125% a la edad de 16 días), frente al mismo conjunto de adiciones minerales que en los casos anteriores estudiados.

En el gráfico 5 nuevamente se observa el beneficio del reemplazo del 60% de escoria granulada (M5E60) y en el caso del filler (M5F20), si bien se reduce la expansión no es lo suficiente para evitar que la misma supere el límite de la norma por los motivos expuestos anteriormente

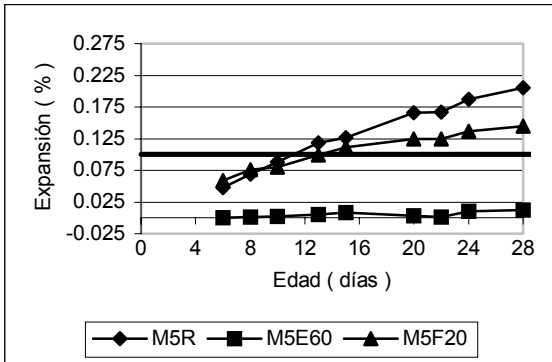


Gráfico 5

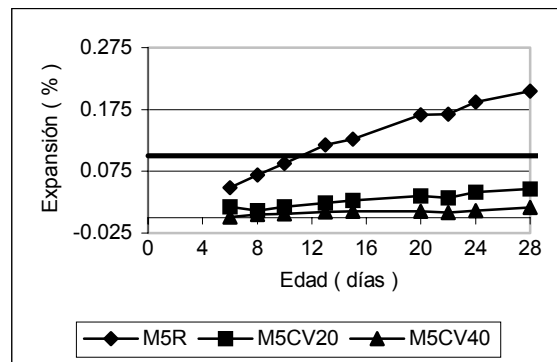


Gráfico 6

En el gráfico 6 se observa un comportamiento similar para esta nueva mezcla reactiva repitiéndose los efectos beneficiosos de las cenizas volantes.

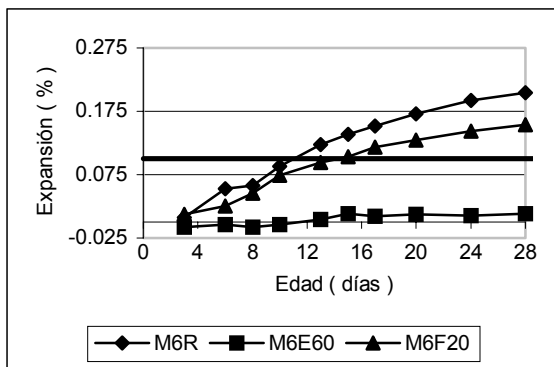


Gráfico 7

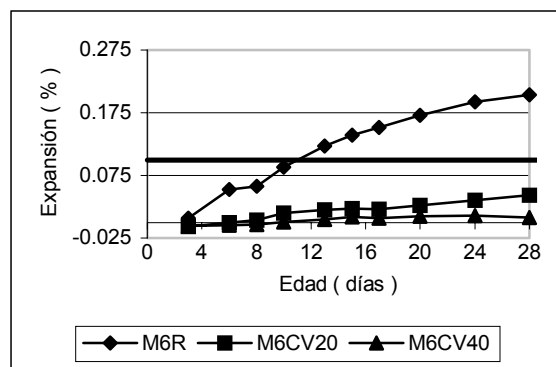


Gráfico 8

Los gráficos 7 y 8 muestran los resultados de las mezclas con un cemento de bajo álcali y el mismo agregado de reacción lenta (M6R), frente a cada una de las adiciones usadas en los casos anteriores.

Las consideraciones que se hicieron para los resultados mostrados en los gráficos 5 y 6 son válidas para este conjunto de mezclas (gráficos 7 y 8).

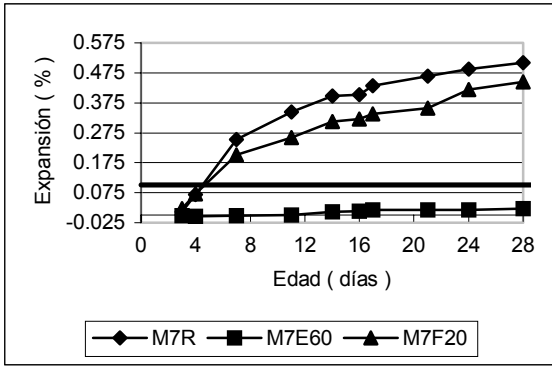


Gráfico 9

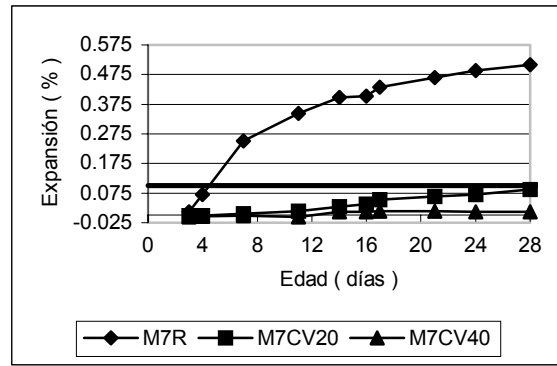


Gráfico 10

Los gráficos 9 y 10 muestran los resultados obtenidos en el estudio de las mezclas de cemento de alto álcali y un agregado natural procedente de la Patagonia (expansión a los 16 días del orden de 0.450%) y la respuesta frente al uso de diferentes adiciones minerales.

El gráfico 9 nuevamente pone en evidencia la acción no inhibitora de la adición de filler (M7F20) y el buen comportamiento de la escoria granulada de alto horno (M7E60) cuando se emplean agregados de fuerte reactividad.

En el gráfico 10 se muestra el comportamiento que la acción inhibitora de las adiciones minerales es muy favorable, manteniéndose los criterios anteriores que mejora el comportamiento a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo del cemento por AMA.

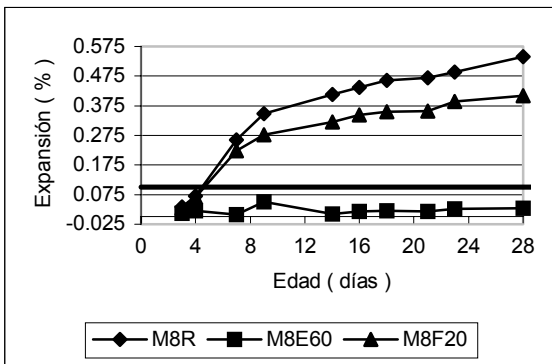


Gráfico 11

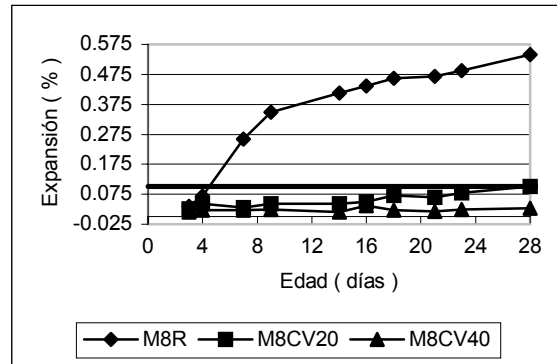


Gráfico 12

Los resultados que se vuelcan en los gráficos 11 y 12 corresponden al comportamiento de morteros hechos con cemento de bajo álcali y un agregado natural rodado patagónico utilizando adiciones minerales en proporciones crecientes.

A fin de abreviar se pueden aplicar consideraciones similares a las hechas para el estudio de los gráficos 9 y 10

El análisis de los resultados obtenidos permite extraer las conclusiones siguientes:

La ceniza volante utilizada es efectiva para inhibir a la reacción álcali sílice. Si bien el porcentaje del 20% da el resultado esperado, es necesario estudiar cada caso en particular para determinar el porcentaje óptimo a aplicar en cada mezcla utilizada, a fin de equilibrar la ecuación técnica-económica.

Los estudios de mezclas que contienen 60% de escoria granulada de alto horno como parte del cemento, inhiben la RAS y ello es coherente con otras experiencias.

La industria del cemento portland, en nuestro país, fabrica rutinariamente cementos con adiciones y cemento compuesto (con varias adiciones minerales simultáneamente) alguno de ellos, atenúan o inhiben la reacción álcali sílice, pero debe quedar conceptualmente claro que es necesario estudiar la solución tecnológica adecuada para cada caso en particular y apoyarla con estudios previos.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Batic, O.R. Sota J.D. Utilización de cenizas volantes en la elaboración de un cemento de albañilería. 10 Reunión de la AATH.
- (2) Batic, O.R. Perez L.G., Sota, J.D. Desarrollo de un ligante hidráulico de bajo costo para uso en viviendas en base a Cal-Ceniza Volante. México 1989.
- (3) Sota, J.D. Falcone, D.D., Batic O.R. Experiencias para evitar la reacción álcali sílice (ras) empleando cementos con adiciones minerales activas. Cuba 2004.
- (4) Batic O.R., Sota J.D., "Influencia de la incorporación de cenizas volantes sobre la reacción álcali-agregado".IX Conferencia Interamericana sobre Tecnología de Materiales (Chile 1987).
- (5) Batic O.R., Sota J.D., "Algunas experiencias sobre cementos mixtos con escoria granulada de alto horno".Publicado en la Revista Hormigón N°8. Setiembre-Diciembre de 1982, pág. 23 a 30.
- (6) Batic O.R., Sota J.D. "Valoración del comportamiento de las adiciones minerales activas frente a la reacción álcali-sílice usando un método acelerado".Conferinta Nationala en Participare Internationala Comportarea in Situ a Constructölor Editia. Octombrie. Buzias. Romania, 1998.

Sota Jorge D.

Profesional Principal de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. Vice Presidente de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. LEMIT Calle 52 y 121 – 1900 La Plata –Argentina . Tel. 05402214831142/44 Fax 05402214250471. email jdsota@netverk.com.ar, jdsota@frlp.utn.edu.ar