

INCORPORACION DE CENIZAS DE RESIDUOS PATOGENICOS EN MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND

Genazzini, C.^(), Giaccio, G.^(**), Ronco, A.^(***) y Zerbino, R.^(****)*

RESUMEN

La mayoría de los hormigones incluyen en su composición adiciones. Aunque los beneficios tecnológicos y económicos son las razones fundamentales que propician su uso, en muchas oportunidades ha sido motivado para prevenir la contaminación ambiental mediante una correcta disposición de subproductos o residuos. El desarrollo del sector productivo industrial en nuestro país ha llevado aparejada la generación de gran cantidad y variedad de residuos, sin que se haya acompañado con una gestión adecuada de los mismos. Teniendo en cuenta que los residuos de características especiales o peligrosas requieren de metodologías específicas de manejo, la búsqueda de alternativas tecnológicas que permitan soluciones ambientalmente compatibles es una de las prioridades a resolver. Este trabajo analiza la posibilidad de incorporar cenizas de residuos patogénicos en materiales a base de cemento portland. Se elaboraron morteros que incluyen un reemplazo de hasta 50 % de cemento por ceniza evaluando sus efectos sobre el tiempo de fraguado, resistencia, absorción en agua, lixiviación y análisis del contenido de metales en el agua recogida de un ensayo de permeabilidad. Los resultados indican que los sistemas con cemento portland pueden convertirse en una alternativa para la disposición de estas cenizas. No obstante aspectos muy importantes como la variabilidad en las características de las cenizas y sus efectos en morteros y hormigones deben ser analizados con mayor profundidad.

INTRODUCCION

Actualmente la mayoría de los hormigones incluyen en su composición adiciones minerales como puzolanas, ceniza volante, escoria de alto horno y filler calcáreo entre otras, sea porque fueron incorporadas dentro del cemento o por separado como otro componente. Aunque los beneficios tecnológicos y económicos son las razones fundamentales del uso de adiciones, en muchas oportunidades, especialmente en el caso de cenizas volantes, ha sido propiciado para prevenir la contaminación ambiental mediante una correcta disposición de las mismas. Como ejemplo de esto se han diseñado hormigones estructurales que incluyen altos volúmenes de ceniza volante o escoria de alto horno (1).

(*) Becario CIC, CIMA-LEMIT
(**) Investigador CIC, LEMIT-UNLP, Prof. Fac. Ing. UNLP
(***) Investigador CONICET, CIMA-UNLP, Prof. Fac. Cs. Exactas, UNLP
(****) Investigador CONICET, LEMIT-UNLP, Prof. Fac. Ing. UNLP

En este sentido los materiales a base de cemento portland aparecen como una alternativa viable para la deposición y aprovechamiento de algunos residuos aunque esto requiere de estudios específicos (2). De este modo, en los comienzos de un siglo donde los criterios ambientales pasan a ser trascendentes, la industria del cemento y del hormigón puede realizar un aporte significativo (3).

Algunos antecedentes vinculados a la introducción de residuos en materiales a base de cemento Pórtland se describen a continuación. Wainwright y Boni (4) reportaron resultados de ensayos de laboratorio para la inclusión de un residuo doméstico sintético como agregado en el hormigón. Berg y Neal (5) analizaron el posible uso de residuo sólido municipal en la elaboración de hormigón de albañilería. Ali y Chang (6) estudiaron la resistencia y durabilidad de ladrillos conteniendo cenizas de incineración de residuos municipales. Hamernik y Frantz analizaron las características de las cenizas de distintos residuos municipales y las propiedades de los hormigones con hasta un 60 % de reemplazo de cemento por ceniza (7) (8). Se reportaron algunos efectos en detrimento en el tiempo de fraguado, lo cual concuerda con las observaciones de Lavat y Trezza (9) en la influencia de la presencia de Pb en la inhibición de la hidratación temprana del cemento. Stephan et al. (10) (11) observaron la influencia de Cr, Ni y Zn en las propiedades de las fases puras de clinker C3S, C3A y C4AF, determinaron que los metales pesados pueden tener un efecto decisivo en la estructura y reactividad de todas las fases de clinker puro sólo cuando la dosificación es mucho mayor que la concentración natural en el cemento portland ordinario. A su vez Stephan et al. (12) estudiaron los cambios en el proceso de la hidratación de cementos hechos a partir de clinker con Cr, Ni y Zn comparado con cementos no dopados; llegaron a la conclusión de que tales metales pesados no influyen en la resistencia de los morteros, ni en el tiempo de fraguado inicial, ni en la hidratación del cemento, aún en concentraciones de 10 á 20 veces superiores a la normal. A muy altas concentraciones el Cr acelera la hidratación y el tiempo de fraguado del cemento, y disminuye la resistencia. Con grandes contenidos de Zn la hidratación y tiempo de fraguado se ven retrasados, mientras que la resistencia aumenta. El Ni, aún en altas cantidades, no produce grandes modificaciones. Andac y Glasser (13), y Hillier et al. (14) estudiaron mecanismos de lixiviación a largo plazo de cenizas de residuo sólido municipal estabilizadas en sistemas a base de cemento portland; no fueron detectados ninguno de los metales tóxicos analizados (antimonio, arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio) ya sea porque están presentes en la matriz cementícea en concentraciones insignificantes, retenidos en la matriz cementícea, o bien presentes en forma de un compuesto insoluble. Klich et al. (15) observaron que los mismos factores ambientales que afectan la durabilidad del hormigón también deben ser considerados cuando se evalúa la durabilidad y permanencia de residuos solidificados y estabilizados en sistemas cementíceos. Afirmaron que aunque la degradación de residuos tratados después de 6 años es leve, las consecuencias son significativas si se considera que el hormigón puede desintegrarse completamente en un período de 50 a 100 años; por lo tanto no recomiendan el entierro de residuo estabilizados y solidificados en sistemas a base de cemento en zonas con deterioro ambiental.

El desarrollo del sector productivo industrial en nuestro país ha llevado aparejada la generación de gran cantidad y variedad de residuos, sin que se haya acompañado con una gestión adecuada de los mismos. Teniendo en cuenta que los residuos de características especiales o peligrosas requieren de metodologías específicas de manejo, la búsqueda de alternativas tecnológicas que minimizan costos y riesgos y permiten soluciones ambientalmente compatibles es una de las prioridades a resolver. Sin lugar a dudas, además de la minimización desde la generación, la problemática de la disposición, combinada con el reciclaje o reutilización de materiales resulta no sólo un tema de actualidad sino una necesidad imperiosa para la comunidad.

Este trabajo es parte de un proyecto que analiza la posibilidad de incorporar cenizas de residuos patogénicos en materiales a base de cemento portland. Se analizan los resultados de la caracterización química y propiedades físicas de morteros que incluyen un reemplazo de hasta 50 % de cemento por ceniza de incineración de residuos patogénicos.

EXPERIMENTOS

Caracterización de las cenizas

Los experimentos fueron efectuados usando cenizas provenientes de la incineración de residuos patogénicos. El material fue homogeneizado y tamizado en laboratorio a través del tamiz de 2 mm. La Tabla 1 muestra la densidad y la distribución del tamaño de las partículas de cenizas. El contenido de humedad se determinó a peso constante a 100 °C. La pérdida por ignición fue medida entre 550 y 850 °C. Personal del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas (UNLP) determinó la ausencia de material radiactivo en las cenizas.

Tabla 1: Propiedades físicas y análisis químicos de las cenizas

Propiedades físicas		Componente	Contenido (%)
Distribución del tamaño de partícula		Ca	23.70
		Mg	1.69
Tamiz N°	Pasa (%)	Al	7.60
8	100	Fe	3.25
16	83	Mn	0.09
30	67	Na	2.70
50	49	K	0.50
100	32	Si	0.18
		Metales pesados (Zn>Cu>Pb>Cr>Cd)	0.40
Contenido de humedad		SO ₄ ²⁻	4.10
7.5 %		Cl ⁻	0.96
		NO ₃ ⁻	0.65
Densidad		PO ₄ ³⁻	1.10
2.5		CO ₃ ²⁻ (de LOI)	17.47

Todos los análisis químicos fueron hechos utilizando la fracción de las cenizas menor a 300 micrones y también aparecen en la Tabla 1. El contenido de Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb y Zn se determinó utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian Spectra AA) con llama aire: acetileno de acuerdo a técnicas estandarizadas previa digestión ácida de las muestras (16). El de K y Na se calculó con el mismo instrumento usando el modo de emisión.

El contenido de cloruros en la muestra digerida con ácido se analizó mediante el método argentométrico (17), si, por el método del molibdosilicato (18), y NO_3^- , por el método espectrométrico UV selectivo (19), se determinó usando un instrumento UV-visible Shimadzu 1203. La concentración de PO_4^{3-} y SO_4^{2-} se midió por técnicas gravimétricas (20).

Tabla 2: Propiedades físicas y análisis químico de los cementos.

Propiedades	N	F	E
Retenido tamiz 75 μm (%)	3.1	4.6	0.8
Superficie específica Blaine cm^2/g	3270	3490	4680
Pasta de consistencia normal (%)	24.3	24.2	25.5
Fraguado inicial (h:m)	03:05	03:10	02:05
Fraguado final (h:m)	04:05	04:15	03:15
Resistencia a compresión (MPa) 1 día	118	129	229
Resistencia a compresión (MPa) 7 días	344	360	499
Resistencia a compresión (MPa) 28 días	439	454	608
Expansión en autoclave (%)	0.02	0.03	0.01
Pérdida por calcinación (%)	1.43	5.36	1
SO_3 (%)	2.7	2.82	2.65
CaO (%)	64.55	62.47	64.96
MgO(%)	0.52	0.54	0.52
Na_2O (%)	0.05	0.05	0.06
K_2O (%)	1.08	1.00	1.04
Fe_2O_3 (%)	4.03	3.47	4.05
SiO_2 (%)	21.28	19.68	21.53
Al_2O_3 (%)	3.96	3.77	3.98
Residuo insoluble (%)	0.31	1.3	0.2

Preparación de morteros

Se elaboraron cuatro series de morteros con diferentes relaciones agua/(cemento+ceniza) (0.35 ó 0.50) reemplazando 10, 25 ó 50 % del peso del cemento por cenizas de residuos patogénicos. En cada caso se incluyó un mortero de referencia (sin ceniza). Se usaron tres tipos de cemento: normal (N), de alta resistencia inicial (E) y con filler calcáreo (F). A la menor relación agua/(cemento+ceniza) se adicionó un superfluidificante de base naftalénica. En la Tabla 2 se informan las características de los cementos. Los morteros se prepararon usando técnicas convencionales en una mezcladora Howard. En la Tabla 3 se presentan las proporciones de las mezclas.

Tabla 3: Proporciones de los morteros elaborados.

Mortero	a/(c+ceniza)	Arena (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Agua (g)	Superfl.(ml)
N	0.35	2800	1400	-	490	10
NC10			1260	140		9
NC25			1050	350		33
NC50			700	700		28
E			1400	-		13
EC10			1260	140		16
EC25			1050	350		21
EC50			700	700		31
5N	0.50	3300	1200	-	600	-
5NC10		3300	1080	120		
5NC25		3300	900	300		
5NC50		3050	600	600		
5F		3800	1200	-		
5FC10		3300	1080	120		
5FC25		3300	900	300		
5FC50		3300	600	600		

Evaluaciones

Para analizar el efecto de la inclusión de cenizas en el proceso de hidratación del cemento, se midieron la variación de la temperatura durante las primeras horas y el tiempo de fraguado. Se moldearon probetas para evaluar la resistencia, absorción de agua, densidad y permeabilidad de agua a presión. Finalmente con el objetivo de analizar el impacto ambiental de la incorporación de cenizas en los morteros se efectuaron los ensayos de lixiviación y el análisis químico del agua que pasa a través de las muestras durante el ensayo de permeabilidad. Los morteros fueron almacenados en recipientes individuales aislados a 20 °C, con una película de agua destilada para mantener las muestras saturadas hasta las edades de ensayo (28 ó 110 días).

Evolución de Temperatura y Tiempo de Fraguado: La evolución de la temperatura fue medida en muestras de 600 cm³, ubicadas en recipientes aislados térmicamente, con una termocupla inmersa en el centro para registrar la elevación de temperatura durante la primeras 30 horas. Las medidas fueron realizadas cada 30 minutos con una sensibilidad de 1 °C. El tiempo de fraguado de los morteros fue medido mediante el ensayo de penetración según la norma ASTM C-403 (21).

Resistencia a flexión y compresión: Se prepararon prismas de 4 x 4 x 16 cm para la evaluación de la resistencia a flexión y compresión según la norma UNE 80 301 (22).

Absorción y Densidad: La evaluación de la absorción (24 horas en agua) y densidad fue efectuada en cubos de 4 cm siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C-127 (23). Considerando los valores de la densidad teórica y la densidad medida experimentalmente se realizó la estimación del contenido de aire en el mortero.

Ensayo de Lixiviación: Se usaron muestras de 110 días resultantes del ensayo de compresión que fueron molidas y tamizadas; este material fue extraído en una solución acuosa de ácido acético mantenida a pH 5.5 durante 24 horas agitando según un procedimiento estandarizado (24). Se efectuó el análisis de metales pesados contenidos en el agua de extracción por el mismo método previamente descripto.

Permeabilidad al Agua: Se prepararon muestras en forma de discos de 150 mm de diámetro y 25 mm de altura con el objetivo de analizar el efecto de la incorporación de cenizas en la permeabilidad de los morteros. Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos generales de la recomendación RILEM CPC-13.1 (25) para penetración de agua, usando un permeámetro con capacidad de presión hasta 1 MPa. La Figura 1 muestra un esquema de la disposición de ensayo. Se midieron los coeficientes de permeabilidad al agua; posteriormente, sobre el agua pasante, se realizó un análisis de la cantidad de metales disueltos por el flujo de agua a través de la masa de mortero.

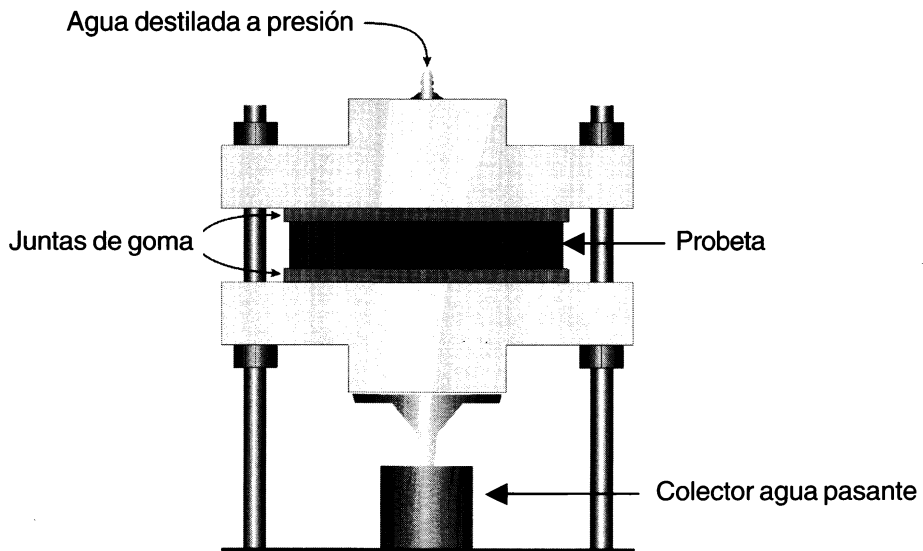


Figura 1. Esquema de la disposición del ensayo de permeabilidad al agua a presión.

RESULTADOS

En lo que se refiere a las propiedades del mortero en estado fresco en todos los casos se obtuvo una trabajabilidad adecuada que permitió el moldeo y compactación de las probetas. Cuando se introdujeron cenizas se incorporó una notable cantidad de aire, la cual aumenta fuertemente con el porcentaje empleado.

También se detectaron algunas eflorescencias de productos de calcio en la superficie de los morteros después del desmoldado. La cantidad de las mismas aumentó con el contenido de ceniza.

Es importante indicar que para los mayores porcentajes de reemplazo de cemento por ceniza tuvo lugar una importante elevación de la temperatura y expansión del material durante las primeras horas después del mezclado.

El seguimiento de la evolución de la temperatura durante las primeras horas muestra que en muchos de los morteros con cenizas se observa un pico de calor previo al correspondiente a la hidratación del cemento (indicando una reacción con las cenizas). Este pico es acompañado por una expansión y ambos efectos resultan más notables a medida que la relación agua/(cemento+ceniza) disminuye y el porcentaje de reemplazo de cemento por ceniza aumenta.

Por ejemplo, la Figura 2 muestra la evolución de la temperatura con el tiempo para la serie N (a/c +ceniza = 0.35). Puede verse que el pico de temperatura correspondiente a la hidratación del cemento disminuye a medida que el porcentaje de ceniza aumenta. Por otro lado, el pico de temperatura producido por la reacción de la ceniza (primer pico) claramente aumenta con el contenido de ceniza. En la Tabla 4 se presentan los tiempos transcurridos y las diferencias de temperatura (DT) correspondientes al primer (reacción de las cenizas) y segundo pico (hidratación del cemento).

Por este motivo, de modo complementario, se prepararon cuatro morteros adicionales con los siguientes ligantes: 100 % ceniza, 50 % ceniza - 50 % cemento, 100 % cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y 50 % ceniza - 50 % cal; todos con relación agua/ligante de 0.35. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos. Es evidente que existe una reacción específica que se verifica en el mortero con 100 % de ceniza. Después de 48 horas este mortero aparecía rígido a diferencia del preparado con 100 % de cal, el cual permanecía plástico. No obstante, la resistencia desarrollada por el mortero con 100 % de ceniza fue muy baja.

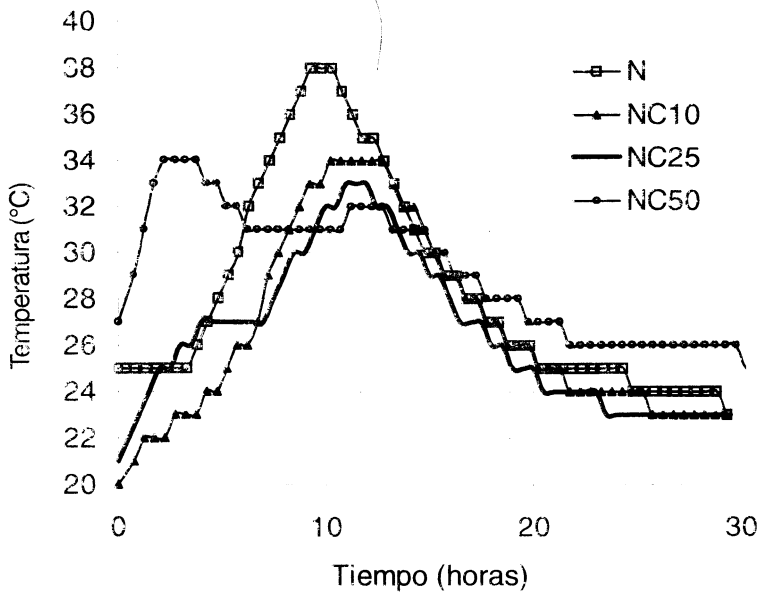


Figura 2. Evolución de la temperatura durante las primeras horas. (Serie a/c+ceniza = 0.35).

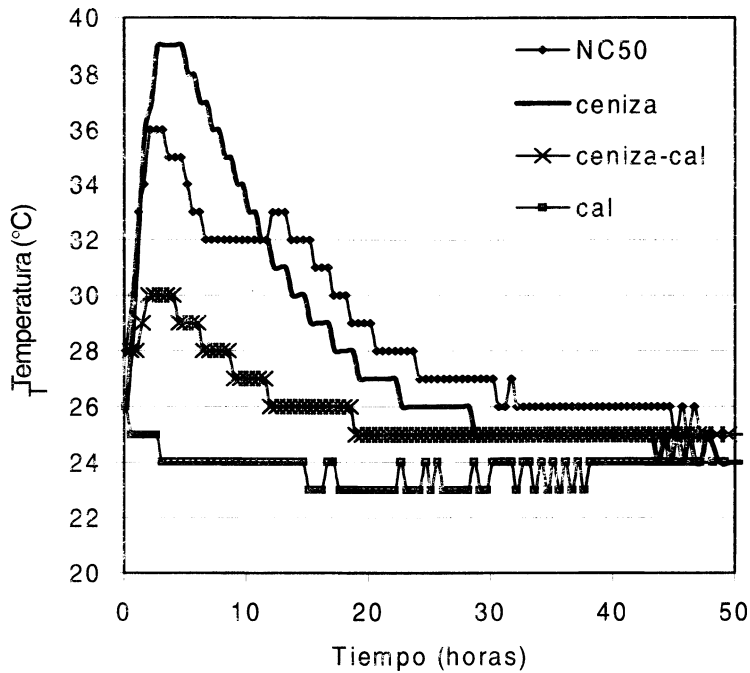


Figura 3. Evolución de la temperatura durante las primeras horas en morteros preparados con diferentes tipos de ligante (50 % cemento – 50 % ceniza, 100 % ceniza, 50 % cal – 50 % ceniza, y 100 % cal).

Tabla 4: Tiempo de fraguado y elevaciones de temperatura correspondientes al primer (reacción de las cenizas) y segundo pico (hidratación del cemento).

Muestra	TFI (h:m)	TFF (h:m)	Primer pico		Segundo pico		
			t pico (h:M)	ΔT (°C)	ti (h:m)	t pico (h:m)	ΔT (°C)
NC10	04:10	05:30	#	#	02:50	09:25	13
NC25	06:05	08:10	01:00	1	03:00	10:00	12
NC50	06:55	09:20	03:50	5	06:00	10:50	11
5N	06:05	11:50	02:00	10	06:55	11:00	8
5NC10	06:00	08:35	#	#	03:00	10:35	7
5NC25	06:20	10:05	nm	nm	nm	nm	nm
5NC50	08:50	12:45	#	#	03:15	08:30	6
E	08:45	13:50	01:10	1	04:50	10:10	3
EC10	03:45	05:00	#	#	02:00	08:20	20
EC25	04:35	06:10	1	2	02:50	08:35	19
EC50	05:10	06:45	04:05	4	04:15	08:20	18
5F	05:25	11:40	05:40	5	04:45	09:25	3
5FC10	06:25	09:05	#	#	03:00	11:00	7
5FC25	06:50	10:30	#	#	04:30	09:15	6
5FC50	07:25	11:40	#	#	01:50	08:25	6
	08:55	14:10	01:25	2	06:55	10:30	4

TFI: Tiempo de fraguado inicial
TFF: Tiempo de fraguado final
ti: Tiempo inicial (momento de mezclado)
t pico: Tiempo transcurrido entre el mezclado y el pico de temperatura.
 ΔT : variación de temperatura
#: no se observa
nm: no fue medido

La Tabla 4 también muestra los valores de los tiempos de fraguado inicial y final. Se encontró un retraso en el tiempo de fraguado a medida que aumenta el contenido de ceniza y como se esperaba el fraguado tuvo lugar antes en las series con menor relación agua/(cemento+ceniza). Es interesante notar que aunque el tiempo de fraguado final siempre aumenta con el contenido de ceniza, el tiempo de fraguado inicial no aumenta en el caso de los morteros que incorporan 50 % de ceniza. Este hecho indica que la reacción de la ceniza contribuye con el endurecimiento de la pasta.

La Tabla 5 muestra los resultados de resistencia a flexión y a compresión obtenidos a edades de 28 y 110 días. Puede verse que la incorporación de cenizas disminuye la resistencia, siendo más significativa esta pérdida a medida que los porcentajes de reemplazo aumentan, sin embargo mientras un 10 % de ceniza ya provoca una fuerte caída, no es tan grande la diferencia entre 25 y 50 % de ceniza.

Los resultados de densidad y absorción también se presentan en la Tabla 5, cada valor es la media de dos valores determinados a la edad de 110 días. A medida que aumenta el contenido de ceniza crece la absorción de agua y disminuye la densidad, lo cual es coherente con los valores de resistencia. También, se indica el contenido de aire en los morteros, observándose un importante incremento en el porcentaje de aire a medida que el cemento es reemplazado por las cenizas. Dicho incremento es coherente con el cambio en la porosidad del material y justifica la fuerte caída en la resistencia.

Tabla 5: Propiedades físico-mecánicas de los morteros.

Muestra	Dr (g/cm ³)	Dt (g/cm ³)	A (%)	Aire (%)	MR (MPa)		f'c (MPa)	
					28 días	110 días	28 días	110 días
N	2.12	2.34	7.3	9.4	9.3	11.4	56.6	63.9
NC10	1.94	2.33	8.6	16.7	6.0	7.1	26.2	33.7
NC25	1.80	2.29	9.4	21.4	4.4	5.4	17.6	21.0
NC50	1.72	2.27	9.8	24.3	4.1	4.7	14.0	19.7
5N	2.12	2.28	8.2	7.0	8.4	8.4	39.9	41.8
5NC10	1.88	2.27	9.8	17.2	4.9	5.9	20.1	24.3
5NC25	1.74	2.26	10.8	23.0	3.8	4.9	11.7	17.1
5NC50	1.67	2.21	10.9	24.4	2.9	4.4	8.9	13.5
E	2.18	2.34	6.7	6.8	9.8	10.5	69.4	65.0
EC10	1.99	2.32	7.8	14.2	6.7	7.5	31.8	35.9
EC25	1.87	2.30	8.7	18.7	4.7	6.2	24.7	29.2
EC50	1.77	2.26	9.2	21.7	4.0	5.5	19.9	24.5
5F	2.11	2.31	7.9	8.7	6.6	6.8	33.8	35.8
5FC10	1.87	2.27	10.0	17.6	4.2	5.4	19.3	23.8
5FC25	1.75	2.26	10.9	22.6	3.8	5.3	11.0	16.7
5FC50	1.65	2.23	12.7	26.0	2.6	4.8	7.4	14.2

Dr : Densidad real

DT: Densidad teórica

A: Absorción

MR: Módulo de rotura

f'c: Resistencia a compresión

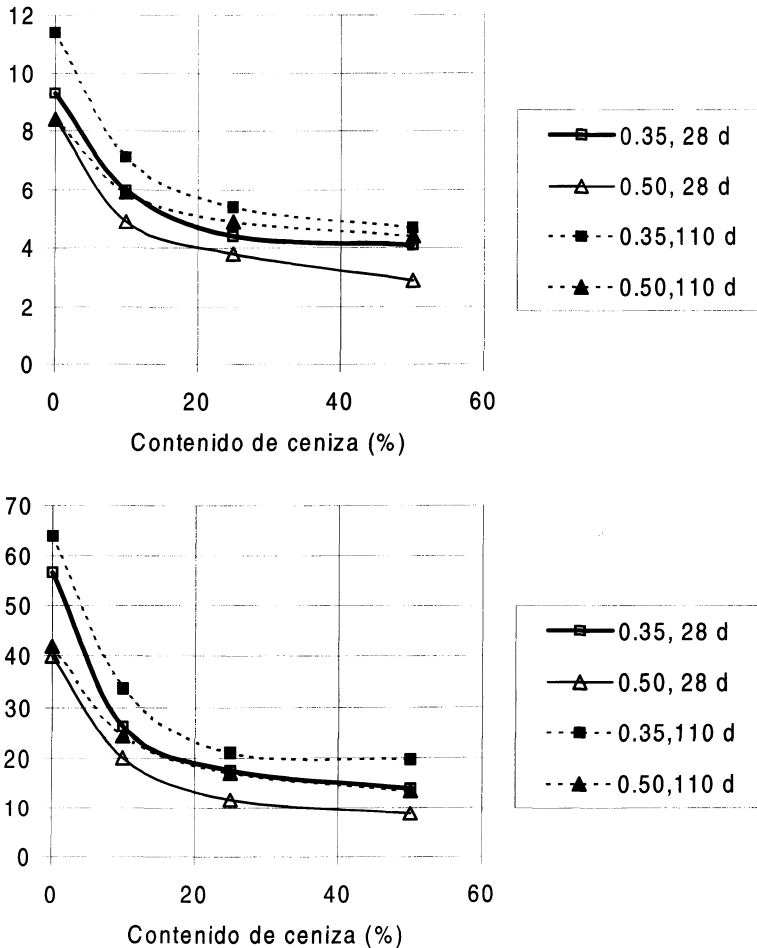


Figura 4. Variación de resistencia a flexión y a compresión en morteros con diferentes contenidos de ceniza y cemento normal (N).

La Figura 4 muestra para cada relación agua/ligante la variación de la resistencia a flexión y a compresión con el contenido de ceniza, medidas a las edades de 28 y 110 días. La inclusión de cenizas redujo notablemente la resistencia de los morteros, variando la pérdida de resistencia de modo no lineal con el porcentaje de ceniza. Observando esta tendencia parece que el uso de muy bajos contenidos de ceniza (10 %) no es una buena opción, dado que las reducciones en resistencia en estos casos fueron cercanas al 50 %.

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación y permeabilidad. También, se indican los correspondientes a la ceniza por separado. Puede verse que los valores de Cr, Cd y Cu en los morteros son bajos y similares a los de las cenizas, pero hay una pequeña disminución en el contenido de Pb y una fuerte disminución

en el contenido de Zn. Comparando la concentración de Zn en el lixiviado de las cenizas solas y en el lixiviado de los diferentes morteros aparece una reducción importante cuando se analizan los morteros, siendo las concentraciones de Zn no mayores a 50 mg/L y 1.3 mg/L, respectivamente. Esta diferencia indica que hubo una importante fijación de Zn, concordando con Lavat et al.(9) y Poon et al.(26), siendo los demás metales pesados fijados en menor proporción o incluso no fijados.

Los datos obtenidos muestran que en general, a medida que el porcentaje de cemento reemplazado por ceniza en los morteros aumenta, crece la lixiviabilidad de los metales pesados. No obstante los valores de lixiviabilidad de los morteros elaborados fueron siempre menores a los límites establecidos: Zn:500mg/L, Cu: 100 mg/L, Pb: 1mg/L, Cr: 5mg/L, Cd: 0.5 mg/L(27).

En la Tabla 6 se muestran los coeficientes de permeabilidad (k) medidos durante las primeras 24 horas. Puede verse que la incorporación de cenizas afecta fuertemente la permeabilidad de los morteros aumentando en 2 ó 3 órdenes de magnitud con respecto al mortero sin cenizas donde los coeficientes de permeabilidad están usualmente en el orden de 10^{-11} m/s.

Tabla 6: Análisis químicos del agua después de los ensayos de lixiviación y permeabilidad y coeficientes de permeabilidad.

Mezcla	Cd (mg/L)		Cr (mg/L)		Cu (mg/L)		Pb (mg/L)		Zn (mg/L)		K (10^{-9} m/s)
	Lix	P	Lix	P	Lix	P	Lix	P	Lix	P	
Ceniza	0.04	-	0.2	-	0.1	-	0.9	-	50	-	-
N	0.03	np	0.2	np	0.1	np	0.5	np	<0.02	np	-
NC10	nm	<0.02	nm	0.1	nm	0.5	nm	<0.25	nm	<0.02	np-10
NC25	<0.02	<0.02	0.1	0.1	0.3	<0.1	0.6	<0.25	0.3	0.04	6-10
NC50	0.04	<0.02	0.1	0.3	0.7	<0.1	0.7	<0.25	1.3	0.01	150-300
5N	0.03	np	0.2	np	<0.1	np	0.3	np	0.03	np	-
5NC10	0.02	np	0.2	np	<0.1	np	0.3	np	0.04	np	np-4
5NC25	nm	0.02	nm	0.4	nm	1.5	nm	0.25	nm	0.78	2-6
5NC50	0.03	<0.02	0.4	<0.1	0.1	<0.1	0.3	<0.25	0.15	0.02	25-300
E	0.03	np	0.2	np	<0.1	np	0.3	np	<0.02	np	-
EC10	0.03	np	0.1	np	<0.1	np	0.3	np	<0.02	np	-
EC25	nm	<0.02	nm	0.7	nm	1.5	nm	0.3	nm	0.22	1-12
EC50	0.02	<0.02	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	<0.25	0.66	0.01	4-20
5F	0.02	np	0.2	np	<0.1	np	0.3	np	0.03	np	-
5FC10	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	3-6
5FC25	nm	<0.02	nm	0.2	nm	1	nm	0.28	nm	0.14	2-6
5FC50	0.03	<0.02	0.3	<0.1	0.1	<0.1	0.3	<0.25	1.21	0.01	6-30

Lix: ensayo de lixiviación.

P: ensayo de permeabilidad.

K: coeficiente de permeabilidad.

nm: no fue medido.

np: no pasó agua a través de la probeta.

En los morteros que incorporan cenizas los coeficientes de permeabilidad fueron mayores a 10^{-9} m/s. En morteros de cemento portland y hormigones el coeficiente de permeabilidad disminuye con el tiempo debido al hinchamiento de algunos productos de hidratación. En este caso aparecen importantes decrecimientos durante las primeras horas. Es importante notar que en estas experiencias fue necesario adoptar para los ensayos de permeabilidad presiones menores a las usadas para ensayar hormigones y morteros convencionales (0.2-0.5 MPa). Como puede observarse en la Tabla 6 el coeficiente de permeabilidad de morteros con relación agua/ (cemento+ceniza)= 0.35 fue mayor que el correspondiente a la relación agua/(cemento+ceniza)= 0.50. Aunque el sistema original tiene muy baja porosidad, el alto contenido unitario de ligante acrecentó la reacción con la ceniza generando más defectos. Además, como se mencionó, en este grupo de morteros hubo un alto incremento en la temperatura, seguido por endurecimiento, y generación de huecos durante el primer pico que lleva a gran variabilidad de sus propiedades físicas, especialmente la permeabilidad.

Finalmente se hicieron los análisis químicos del agua recolectada que pasó a través de los discos sometidos al ensayo de permeabilidad; los resultados también se presentan en la Tabla 6. El contenido de metales pesados determinado fue menor que el obtenido en el ensayo de lixiviación, especialmente en el caso del Zn y Pb. En el caso del Zn decrece en más de un orden. Este último comportamiento puede atribuirse a la formación de $Zn(OH)_2$ insoluble. Debe mencionarse que los análisis químicos fueron hechos sobre el agua recolectada durante las primeras horas del ensayo.

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de los análisis químicos y de las propiedades físico-mecánicas de los morteros indican que los sistemas con cemento portland pueden convertirse en una alternativa para la disposición de cenizas de la incineración de residuos patogénicos. En el caso de las cenizas estudiadas los contenidos de metales peligrosos fueron menores a los límites establecidos y en varios casos se detecta la fijación de algunos metales. No obstante, es evidente que aspectos muy importantes como la variabilidad en las características de las cenizas y sus efectos en los morteros y hormigones deben ser analizados con mayor profundidad. Particularmente, se considera necesario desarrollar más estudios en lo vinculado con durabilidad de los morteros que incorporan esta clase de cenizas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dra. J. Desimoni del Departamento de Física (UNLP) por la medición de radiactividad, al Dr. N. Firpo y la Srta. E. Moschione por la asistencia en los análisis químicos. Los cementos fueron suministrados por Cementos Avellaneda y el superfluidificante por GRACE S.A

REFERENCIAS

- (1) Giaccio, G.M. and Malhotra, V.M. "Concretes Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash", *ASTM Journal, "Cement, Concrete and Aggregates"*, vol.10, n°2, winter 1988, pp 88-95.
- (2) Schiessl P., and Hohberg I., "Environmental Compatibility of Cement- Based Building Materials", *Proc. Mario Collepardi Symp. on Concrete Science and Technology Today*, 1997.
- (3) Mehta P. K., "Bringing the Concrete Industry into A New Era of Sustainable Development", *Proc. Mario Collepardi Symp. on Concrete Science and Technology Today*, 1997.
- (4) Wainwright, P. J. and Boni, S. P. K., Some properties of concrete containing sintered domestic refuse as a coarse aggregate, *Magazine of Concrete Research*, v. 35, No. 123, June 1983, pp 75-85
- (5) Berg, Eric R. and Neal, John A., Concrete masonry unit mix design municipal solid waste bottom ash, *ACI Materials Journal*, v. 95, No. 4, July-Aug. 1998, pp 470-479
- (6) Ali, M. T. and Chang, W. F., "Strength properties of cement- stabilized municipal solid waste (MSW) incinerator ash masonry bricks", *ACI Materials Journal*, v. 91, No. 3, May-June 1994, pp 256-263.
- (7) Hamernik, J. D. and Frantz, G. C., "Physical and Chemical properties of municipal solid waste fly ash", *ACI Materials Journal*, v.88, No. 3, May-June 1991, pp 294-301.
- (8) Hamernik, J. D. and Frantz, G. C., "Strength of Concrete containing municipal solid waste fly ash", *ACI Materials Journal*, v.88, No. 5, Sept.-Oct. 1991, pp 508-517.
- (9) Lavat, Araceli E. y Trezza, Mónica A., "Estudio de la inmovilización de metales pesados en la matriz cementícea", *Proc. 1º Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón*, 1988, Argentina, pp 337-350.
- (10) Stephan D., Maleki H., Knofel D., Eber B., and Hardtl R., "Influence of Cr, Ni, and Zn on the properties of pure clinker phases. Part I. C₃S", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 545-552.
- (11) Stephan D., Maleki H., Knofel D., Eber B., and Hardtl R., "Influence of Cr, Ni, and Zn on the properties of pure clinker phases. Part II. C₃A and C₄AF", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 651-657.
- (12) Stephan D., Mallmann R., Knofel D., Hardtl R., "High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker. Part II. Influence on the hydration properties", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 1959-1967.
- (13) Andac M., Glasser F. P., "Long-term leaching mechanisms of Portland cement-stabilized municipal solid waste fly ash in carbonated water", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 179-186.
- (14) Hillier S. R., Sangha C. M., Plunkett B. A., Walden P. J., "Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 515-521.

- (15) Klich I., Batchelor B., Wilding L. P., Drees L. R., "Mineralogical alterations that affect the durability and metals containment of aged solidified and stabilized wastes", *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, pp 1433-1440.
- (16) Method 3050, Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, US EPA, "Test methods for evaluating solid waste"; SW-846, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC 20460, US Environmental Protection Agency, 1986.
- (17) 4500-CI-. B: Argentometric Method, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 20th Edition. Eds. Clesceri L. S., Greenberg A. E. and Eaton A. D. USA, 1998.
- (18) 4500-Si C: Molybdosilicate Method, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 20th Edition. Eds. Clesceri L. S., Greenberg A. E. and Eaton A. D. USA, 1998.
- (19) 4500-NO3-. B: Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 20th Edition. Eds. Clesceri L. S., Greenberg A. E. and Eaton A. D. USA, 1998.
- (20) ASTM C 114-99, Test Method for Chemical Analysis of Hidraulic Cement, "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 04.01, American Society for Testing and Materials, USA, 1999, pp 112.
- (21) ASTM C 403-97, Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, USA, 1999, pp 217-221
- (22) Norma Española UNE 80 301, Madrid, 1999.
- (23) ASTM C 127-88 (1993), Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, USA, 1999, pp 64-68
- (24) Method 1310 A, Extraction Procedure (EP) Toxicity Test Method and Structural Integrity Test, US EPA, "Test methods for evaluating solid waste"; SW-846, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC 20460, United States Environmental Protection Agency, 1990.
- (25) RILEM recommendation CPC-13.1. "Test for penetration of water under pressure on hardened concrete". Draft: Materials and Structures, vol.12, n°69, may-june 1979. Final: Endorsed May 1993, no modification.
- (26) Poon, C. S., Clark, A.I. and Perry, R., "Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes", *Cement and Concrete Research*, v. 16, n°2, 1986, pp 161-172.
- (27) Decreto 831/93, Ley Nacional n° 24051/92 de Residuos Peligrosos, Boletín oficial, Argentina, 1993.