

Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones

M. Rosell⁽¹⁾, R. Galloso⁽¹⁾ y B. Calvo⁽²⁾

(1) Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de la Construcción (CTDMC).
C.ª Casa Blanca y c/ 70. Rpto. Guiteras, La Habana (Cuba)
mercedes@ctdmc.com.cu; galloso@ctdmc.com.cu

(2) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (ETSIM)
C/. Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid (España)
benjamin_calvo@yahoo.es

RESUMEN

Desde épocas antiguas se reporta el uso de las puzolanas naturales en aglomerantes y cementos siendo la más relevante las de Puzzoli, a la cual deben su nombre. Son testimonio de ello las construcciones que aún se conservan desafiando los fenómenos de intemperismo. Se conoce que estas puzolanas, así como otras reportadas en el mundo son tobas zeolitizadas, lo que induce al estudio de las zeolitas naturales como posibles puzolanas en un enfoque novedoso, como adición activa en hormigones. El presente trabajo recoge la caracterización de una zeolita cubana por diferentes métodos, demostrando su actividad puzolánica. Mediante la utilización de la microscopía electrónica de barrido se evidencia dicha reacción. Además, se estudia comparativamente con y sin adición de zeolita la obtención de hormigones de altas resistencias, utilizando para ello un método de dosificación que incluye el cálculo de los áridos de acuerdo a su granulometría, mediante un software diseñado a tal efecto. Como resultado se obtienen hormigones de más de 90 MPa, en cuyas micrografías se observan los cambios morfológicos que ocurren en la estructura del hormigón con esta adición.

Palabras clave: hormigón, microfotografías, MEB, puzolana, zeolitas

Zeolite as an active mineral additive in high yield concrete

ABSTRACT

From ancient times, the use of natural pozzolan has been reported in agglomerates and in cements. The most important of these is that taken from Puzzoli, from whence the name derives. The constructions which are still preserved in defiance of all kinds of inclement weathers are a testimony to its endurance. These pozzolans are well-known, as also are others reported throughout the world. They are zeolite tuffs, which leads to the study of natural zeolite as possible pozzolans from a new angle of focus, as active additions in concretes. The present work collects together the characterization of a Cuban zeolite via different methods, proving its pozzolanic activity. Through the use of electronic scanning microscopy, such a reaction achieves sure confirmation. Further, the obtaining of high resistance concrete is studied, with and without the addition of zeolite. To achieve this, a method of dosification was used which includes calculating aggregates according to their granulometry, by way of software designed specifically to this end. As a result, concretes of more than 90 Mpa are obtained, in the micrography of which, morphological changes are observed that occur in the concrete structure with this addition.

Key words: concrete, microphotography, SEM, pozzolan, zeolites

Introducción

Muchas construcciones del antiguo imperio romano y de la civilización griega, tales como coliseos, panteones, templos estadios, obras hidráulicas entre otras, conservadas hoy en admirables condiciones testimonian una época de la civilización humana. Responsable de su desafío a los fenómenos meteorológicos, ecológicos, en fin, del tiempo, es la utilización en ellas de mezclas con minerales volcánicos tales como la Tierra de Sartorin, Tras Renano o de

Puzzoli hace más de dos siglos. Precisamente la localidad de Pouzzoli dio nombre a este tipo de mineral, llegado a nosotros como puzolanas.

desde el punto de vista de la construcción, y de acuerdo al Comité 232 de la Association Concrete International (ACI, 2002) las puzolanas naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silicea o silico-aluminoso, los que no tienen en si mismos propiedades aglomerantes pero que pueden finamente dividido y en presencia de humedad reaccionar con la cal a temperatura ambiente y formar

productos estables y prácticamente insolubles de características semejantes a los formados durante la hidratación del cemento Portland específicamente la fase tobermorita.

Las zeolitas son minerales del grupo de los *tectosilicatos*; son rocas sedimentarias que proceden de cenizas volcánicas de grano fino que fueron arrastradas por el viento y depositadas en lagos salinos que por reacción con las aguas salinas y por mecanismos de disolución-precipitación se transforman en microcristales de zeolita.

Estructuralmente se consideran tectosilicatos hidratados de aluminio donde el aluminio sustituye el Si en el centro de los tetraedros estructurales con cationes alcalinos y alcalinotérreos que forman estructuras abiertas. Las diferentes combinaciones de los cationes, tanto en disposición como en naturaleza hace que exista una gran familia de zeolitas naturales (Gayoso y Rosell, 2003).

Las zeolitas naturales son abundantes en Cuba, encontrándose mayormente las clinoptilolitas, mordenitas y heulanditas. Varios de los yacimientos han sido estudiados para su utilización como material de construcción, como árido ligero, basados fundamentalmente en su bajo peso volumétrico, como adición en la producción de cementos mezclados y en la producción de un aglomerante alternativo base cal (cemento romano) dada su actividad puzolánica, o puzolanidad (ACI, 2000).

Los trabajos de Mehta (1987), Rabilero (1988), Urrutia y Gener (1991) y Gayoso *et al.* (1993) han demostrado que las zeolitas constituyen materiales con excelentes propiedades puzolánicas que permiten la producción de cementos y otros aglomerantes de elevadas cualidades técnicas para su empleo en la construcción tal como lo ha demostrado la experiencia práctica en Cuba durante tres décadas.

Gayoso y Gil (1994) comenzaron los estudios de utilización de la zeolita como árido ligero en hormigones, con resultados empíricos satisfactorios. La construcción de cinco barcos de 8, 13 y 16 m de eslora bajo la concepción de obtener un aligeramiento en el hormigón fue logrado, obteniendo un peso volumétrico del hormigón 1850 kg/m³.

Pero el estudio en el tiempo de estos hormigones evidenció un incremento sustancial de su resistencia, atribuyéndose este fenómeno a la reacción puzolánica ocurrida entre el mineral zeolítico (árido ligero) y los productos de hidratación del cemento.

Gayoso y Rosell (1997) llegaron a la formulación de un aditivo mineral activo para hormigones, denominado SZ, cuya composición es básicamente mineral zeolítico, y cuyo empleo es microscópicamente fundamentado con los estudios y aplicaciones piloto rea-

lizadas hasta hoy mediante las mediciones del comportamiento físico mecánico de los hormigones.

La continuidad de los estudios anteriores han permitido la dosificación industrial de esta adición, utilizando áridos calizos obtenidos por trituración, logrando hormigones con resistencias a compresión al año de 90 MPa.

La caracterización de los materiales utilizados para la obtención de estos hormigones, el cálculo de su dosificación por medio de un software diseñado a tal efecto, la demostración de la reacción puzolánica de la zeolita y los resultados de resistencia obtenidos comparativamente con hormigones sin adición de zeolita, son presentados en el siguiente trabajo.

Materiales. Caracterización

Cemento

Se usó cemento Portland de la Fábrica de Mariel, cerca de La Habana, las propiedades físico química y mecánicas cumplen los requisitos especificados por NC 54-205:80 para el cemento Portland P-350. Las características fundamentales se muestran en la Tabla 1 y 2.

Propiedades	Muestra 1	Muestra 2	Media
C ₃ S	45	60	52.5
C ₂ S	17	12	14.5
C ₃ A	7.7	7.92	7.8
C ₄ AF	9.5	9.68	9.6
Blaine cm/g ²	3382	3408	3395
Peso Específico	3.12	3.12	3.12
Pérdida por Ignición%	2.62	2.53	2.57
Residuo Insoluble %	2.51	1.11	1.81

Tabla 1. Cemento Portland Mariel. Composición físico-química. Laboratorio CTDMC

Table 1. Mariel Portland cement. Physical-chemical composition. CTDMC Laboratory

Agregados

Los agregados utilizados son:

- Gravilla y granito Dragón Camoa, roca caliza triturada procedente de la San José provincia La

Edad (días)	Muestra 1	Muestra 2	NC:54:205:80
3	25.1	25.3	17.5
7	30.8	31.3	25.0
28	41.1	40.3	35.0

Tabla 2. Cemento Portland Mariel. Resistencia a compresión (MPa). Laboratorio CTDMC
Table 2. Mariel Portland cement. Resistance to compression (MPa). CTDMC Laboratory

Habana. Tamaño máximo nominal: 19 mm y 10 mm respectivamente.

- Arena Dragón Camoa, arena caliza, triturada y clasificada procedente de San José provincia La Habana. Tamaño máximo nominal: 5 mm.

La caracterización aparece en las Tablas 3 y 4.

La distribución granulométrica de los agregados aparece en la Tabla 5.

Adición química

La adición química utilizada es un súper plastificante reductor de agua de alto rango, clasificado tipo F según la Norma de especificaciones ASTM C 494, cuyas propiedades son las siguientes:

	% sólidos	Gravedad específica	pH
Polynaftaleno Sulfonado	34.3 %	1.17	10.52

Zeolita. Adición mineral

La mezcla mineral utilizada es zeolita natural de yacimiento Tasajeras, provincia Villa Clara, de la región Central del país. La caracterización química de la zeolita Tasajera aparece en la Tabla 6.

El derivatograma de esta zeolita se muestra en la Figura 1, donde aparecen los efectos típicos de la clinoptilolita y la heulandita.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
Dragón	3.03	1.75	0.617	45.45	0.03	5.06	0.08	0.064	0.06	43.88

Tabla 3. Caracterización química realizada por fluorescencia. Laboratorio ETSIM
Table 3. Chemical characterization carried out by fluorescence. ETSIM Laboratory

Ensayo	Unidad DC	Arena DC	Granito DC	Gravilla
Peso Vol. seco	g/cm ³	1790	1500	1570
Peso espec. seco	g/cm ³	2720	2610	2640
Absorción	%	0.2	1,2	1.3
Vacios	%	34	42	40
Abrasión. L. Angeles	%	-		20.3

Tabla 4. Agregados. Propiedades físico-mecánica Laboratorio CTDMC
Table 4. Aggregates. Physical-mechanical properties. CTDMC Laboratory

Tamiz (mm)	Pasado en las mallas (%)		
	Arena DC	Granito DC	Gravilla DC
19.05	100.0	100.0	100.0
12.72	100.0	100.0	52.
9.52	100.	89.1	19.6
4.76	98.7	10.8	0.8
2.38	81.9	0.6	0.2
1.19	54.2	0.1	0
0.59	34.6	0	0
0.29	19.1	0	0
0.15	7.6	0	0

Tabla 5. Distribución granulométrica de los agregados. Laboratorio CTDMC
Table 5. Granulometric distribution of the aggregates. CTDMC Laboratory

Oxido	% Masa	Std. Error	Elemento	% Masa	Std. Error
SiO ₂	64.39	0.52	Si	29.93	0.25
Al ₂ O ₃	11.76	0.36	Al	6.22	0.19
Fe ₂ O ₃	1.96	0.15	Fe	1.37	0.11
CaO	3.6	0.1	Ca	2.6	0.07
Na ₂ O	1.47	0.12	Na	1.09	0.09
K ₂ O	1.29	0.13	K	1.07	0.1
MgO	0.61	0.086	Mg	0.368	0.052
TiO ₂	0.31	0.31	Ti	0.186	0.17

Tabla 6. Zeolita Tasajeras. Análisis químico realizado por Fluorescencia. Laboratorio ETSIM
 Table 6. Tasajeras zeolite. Chemical analysis carried out by fluorescence. ETSIM Laboratory

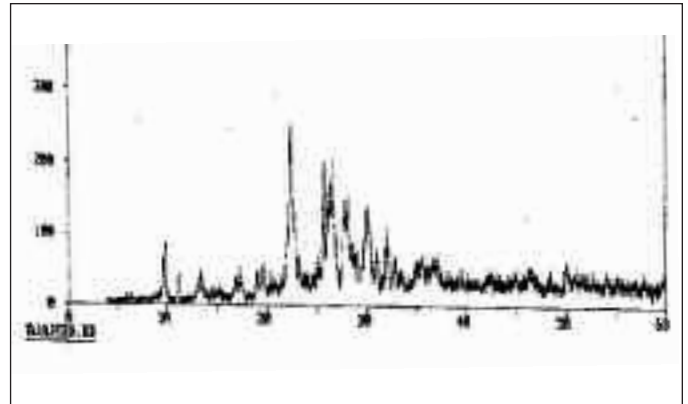


Fig. 1. Derivatograma de la zeolita del yacimiento Tasajeras. Laboratorio ETSIM
 Fig. 1. Derivatogramme of the zeolite of the Tasajeras deposit. ETSIM Laboratory

Zeolita molida en molino de bolas durante una hora, obtuvo como característica la granulométrica la que aparece en la Figura 2.

Evaluación de la zeolita como puzolana

Existen varios métodos para evaluar si un material tiene actividad puzolánica, teniendo en cuenta puntos de vistas químicos, físicos y mecánicos, estableciendo valoraciones en algunos casos cualitativas de refe-

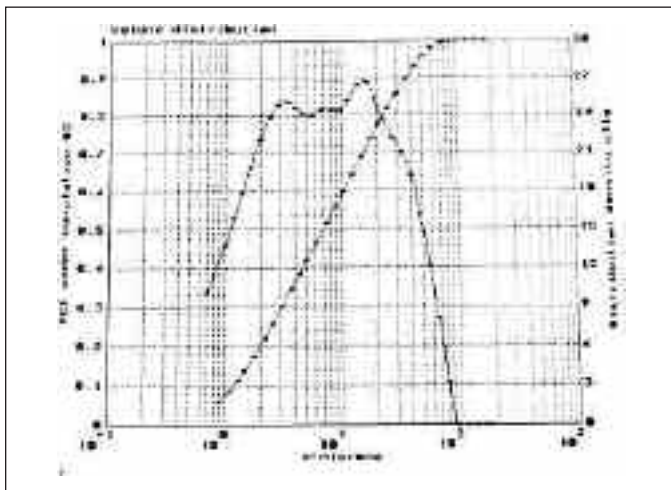


Fig. 2. Evaluación de la zeolita como puzolana
 Fig. 2. Evaluation of the zeolite as pozzolan

rencia a patrones y cuantitativas en otros. Los mecanismos de la acción puzolánica y los métodos para su determinación han sido ampliamente discutidos, no existiendo ningún método que pueda ser aplicado a todas las puzolanas, ya que estas pueden ser diferentes en cuanto a origen geológico, composición química, mineralógica y estado físico.

La valoración del comportamiento mecánico del material ante las condiciones específicas de uso es considerado como criterio definitorio.

La zeolita del yacimiento Tasajeras es analizada de acuerdo a:

- Método desarrollado por el IETcc. Se basa en el desarrollo de la resistencia a la flexotracción y la compresión de morteros tratados con vapor en condiciones prefijadas en probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm.
- Norma ASTM C 311/97. Determinación comparativa con patrón de la resistencia a compresión de morteros con adiciones del 20% de puzolana, sometido a ambiente de vapor de agua durante 7 y 28 días en probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm.
- ASTM C 593/95 Se fundamenta en la determinación de la resistencia a la compresión en mortero de cal-puzolana (1:2), en prismas de 40 x 40 x 160 mm después de tratamiento con vapor de agua durante 7 días.

La tabla 7 resume los resultados obtenidos por los tres métodos en zeolita molida bajo 1 mm y micronizada bajo 74 μm.

Muestra	Resistencia MPa ITEcc		ASTM C 593/95		ASTM C 311/97		
	A/C	Resist. MPa	A/C	Resist. MPa	A/C	Resist. 7d MPa.	Índice Activ %
>1 mm	0.62	12.0.	0.89	8.07	0.53	26.6	79.6
< 0,074 mm	0.65	17.0	0.93	11.92	0.55	38.7	171

Tabla 7. Resultados de la actividad puzolánica de la zeolita Tasajeras, por diferentes métodos
 Table 7. Results of pozzolanic activity of Tasajeras zeolite, by different methods

Por otro lado también es confirmada la reacción puzolánica de la zeolita al realizar difracción de rayos X una pasta de cemento, durante dos años, donde se dosificó zeolita sustituyendo el 10 % del cemento masa/volumen.

En la Figura 3, se puede observar:

- Las reflexiones típicas de heulandita (G) y clinoptilolita (F) en el mortero anhidro.
- La formación de la fase portlandita (I), como producto de la hidratación del cemento a partir de los 7 días, la cual coexiste con la heulandita y la clinoptilolita.
- A partir de los 28 días se observa un decrecimiento de las tres fases antes mencionadas y la formación de una nueva: Tobermorita (J)
- A los 180 días es pequeño el efecto que caracteriza la portlandita, sin embargo es mucho más definida la fase tobermorita representada por dos de sus reflexiones fundamentales.

- A los dos años es apenas perceptible la reflexión de la portlandita, las reflexiones de la heulandita y clinoptilolita han disminuido de intensidad y se aprecia unas reflexiones notable correspondiente a la tobermorita.

Otra evidencia de la reacción puzolánica de la zeolita se obtuvo utilizando la Microscopía Electrónica de Barrido. En primer término se observó la morfología de la zeolita del yacimiento Tasajeras (Fig. 4). Se destacan en ella granos prismáticos y granos más redondeados, que fueron diferenciados químicamente en los sondeos, apreciándose relaciones Si/Al muy diferentes y que de acuerdo al reporte del subcomité de zeolitas de la Internacional Mineralogical Association, corresponden a heulandita y clinoptilolita, aspecto este, que es profundizado en los estudios presentes.

Comparando la morfología de una zeolita después de una reacción de 7 días en una solución sobresaturada de $Ca(OH)_2$ (Fig. 5), se definió la morfología del silicato cálcico aluminoso (punto 1) en formación, en la superficie de un grano de zeolita, lo cual fue confirmado mediante sondeos, donde se aprecia la disminución de la relación Si/Al característica de la zeolita (punto 2).

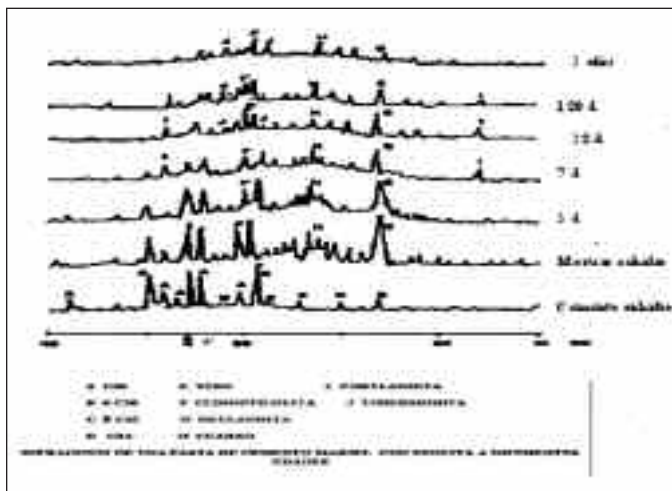
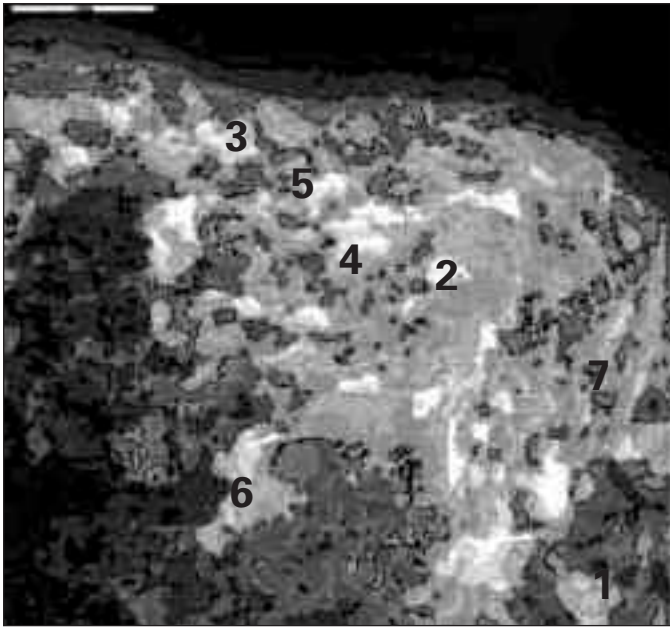


Fig. 3. Difracción de Rayos X de una pasta de cemento con adición de zeolita a diferentes tiempos. Laboratorio CTDMC
 Fig. 3. X-ray diffraction of a cements slurry with addition of zeolite to different times. CTDMC Laboratory

Programa experimental. Hormigones de altas prestaciones.

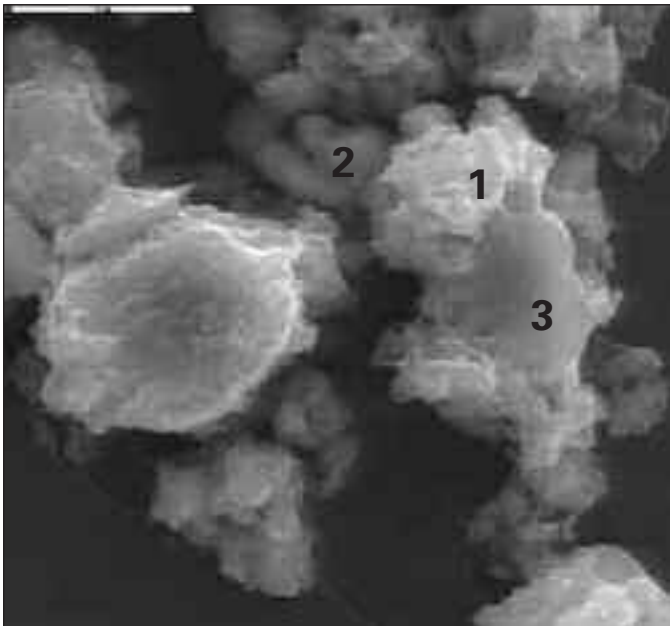
Este programa experimental fue concebido para mostrar la influencia de la zeolita natural en las propiedades físico-mecánicas del hormigón desde el punto de vista puzolánico y la variación del comportamiento de la interfase árido pasta que provoca su reacción.

Las proporciones de los áridos se calcularon por el Software Mezcla CTDMC, que tiene como base la continuidad granulométrica de los agregados, tomando como referencia la curva de Fuller. Las mezclas seleccionadas aparecen en la Tabla 8 y en la Figura 6, se puede observar la distribución y su correlación con Fuller (ACI, 2002)



	Puntos	Si/Al
PRISMAS	1	2.029
	2	1.862
	3	2.12
	Media	2.09
REDONDAS	4	4.52
	5	5.19
	6	4.87
	7	5.14
	Media	4.864

Fig. 4. Micrografía de la zeolita natural y tabla de valores asociada. Lab. CCMA. CSIC. Madrid
 Fig. 4. Natural zeolite micrography and table of asociated values. CCMA Lab. CSIC. Madrid



	Si/Al	Si/Ca
1	0.48	2.5
2	5.1	16.1
3	4.72	0.09

Fig. 5. Micrografía de la zeolita después de reacción con Ca(OH)₂ y tabla asociada de valores. Lab. CCMA. CSIC. Madrid
 Fig. 5. Zeolite micrography after the reaction with Ca(OH)₂ and table of asociated values. CCMA Lab. CSIC. Madrid

La dosificación de cemento fue fijada en 450 Kg/m³; la puzolana, léase zeolita, se dosificó sustituyendo un 10 % masa/volumen de cemento, teniendo en cuenta la variación de sus pesos volumétricos (cemento Mariel y zeolita).

La relación agua cemento utilizada es de 0,35 por

lo que la adición del aditivo químico se ajustó, hasta obtener dicha relación. La nomenclatura usada fue: CD para las que contienen zeolitas y DD las que no contienen dicha adición.

La dosificación para cada una de las series realizadas aparece en la Tabla 9. Se conformaron probetas

Tamiz (mm)	Agregado. Porcentaje pasado			Análisis de regresión		
	Arena	Granito	Gravilla	Curva Fuller	Computer	Desviación
19.05	100	100	100	100	100	0
12.72	100	100	52.0	81.7	83.2	1.5
9.52	100	89.1	19.6	70.7	69.9	0.8
4.76	98.7	10.8	0.8	50.0	48.5	1.5
2.38	81.9	0.6	0.2	35.3	38.6	3.3
1.19	54.2	0.1	-	25.0	25.4	0.4
0.59	34.6	-	-	17.6	16.2	1.4
0.29	19.1	-	-	12.3	9	3.3
0.15	7.6	-	-	9	3.6	5.4
Proporciones	47 %	18 %	35 %	Desviación Total		17.7

Tabla 8. Dosificación de los áridos. Método de cálculo: Software mezcla CTDMC
 Table 8. Dosage of the aggregates. Method of calculation: Software mixes CTDMC

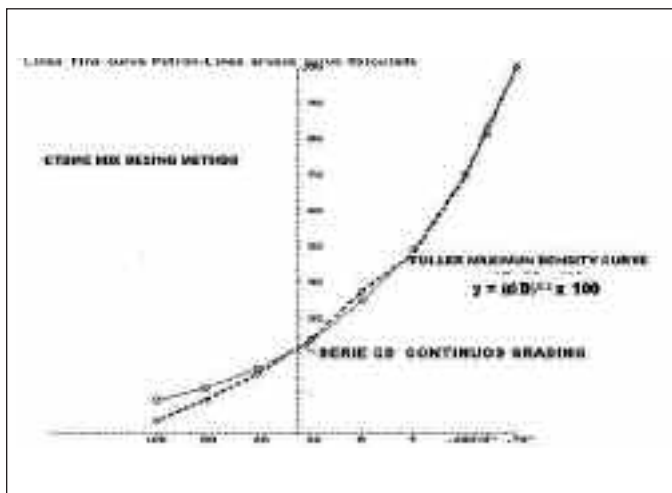


Fig. 6. Curva del diseño de los áridos según mezcla CTDMC.
 Fig. 6. Design curve of the aggregates according to CTDMC mixture

cilíndricas de 15 x 30 cm para las edades de 3, 7, 28 días y un año, que fueron ensayadas de acuerdo a la NC 54

Discusión de resultados

Los resultados de las resistencias a los diferentes tiempos se reportan en la Tabla 10.

Se observa que a la edad de 3 días ya hay un incre-

mento discreto de la resistencia a compresión, el incremento más pronunciado de la resistencia a compresión se observa a partir de los 28 días, llegando a 12 MPa a la edad de un año. En la Figura 7 se aprecia que el aumento de las resistencias se caracteriza por un modelo exponencial donde, la serie CD tiene una mayor pendiente, incrementando en el tiempo las diferencias de resistencias. Esto se debe a la reacción puzolánica que comienza a partir de la formación de la fase portlandita como producto de la hidratación del cemento.

Una muestra de los hormigones a la edad de un año es analizada por SEM, observando claramente las diferencias morfológicas en la zona de interfase árido pasta, debidas a las transformaciones que tienen lugar por la reacción puzolánica, (Fig. 8).

Como los estudios similares llevado a cabo por otros investigadores, Liborio *et al.* (2002) la interfase de la muestra CD se observa más compacta y homogénea, y los cristales de portlandita que se observan son pequeños y de forma laminar, lo cual muestra una morfología totalmente diferente a la muestra DD. En ella pudo verse la formación de cristales de portlandita de gran tamaño, 15 μm, muy acicular, lo cual provoca tensiones internas y posibles fisuras en la interfase que atentan con la durabilidad.

A manera de confirmación de la reacción puzolánica y su efecto en la resistencia del hormigón, se estudió una muestra proveniente de la serie CD después de ensayada al año (Fig. 9). Se pudo definir un grano de zeolita de 48 μm, aún sin reaccionar completamen-

Series	Cemento kg/m ³	Aggregates		Zeolita kg/m ³	Aditivo Químico l/m ³	Agua l/m ³	A/C + Z	Asent. mm	
		Arena kg/m ³	Granito kg/m ³						Gravilla kg/m ³
CD-450-1	450	703	457	580	30	10	156	0.35	19
CD-450-2	450	703	457	580	30	10	156	0.35	22
CD-450-3	450	703	457	580	30	10	156	0.35	21
DD-450-1	450	703	457	580	-	10	156	0.35	19
DD-450-2	450	703	457	580	-	10	156	0.35	20
DD-450-3	450	703	457	580	-	10	156	0.35	21

Tabla 9. Dosificación para los hormigones de altas prestaciones
 Table 9. Dosage for the high performances concretes

Series	3 días		7 días		28 días		1 año	
	X (MPa)	S (MPa)	X (MPa)	S (MPa)	X (MPa)	S (MPa)	X (MPa)	S (MPa)
CD-450-1	47.5	1.6	56.6	0.5	72,9	3.5	96.7	3.1
CD-450-2	54.3	0.8	56.9	3.8	69.9	3.4	95.7	2.6
CD-450-3	55.8	0.2	59.9	2.0	69,1	3.6	96.2	3.5
Media	52.5		57.6		70.9		96.2	
DD-450-1	56.7	1.8	55.5	1.8	70.4	2.0	85.2	2.9
DD-450-2	44.7	0.9	45.9	0.6	59.7	2.0	86.2	2.6
DD-450-3	42.5	1.0	47.1	1.7	54.3	1.5	81.3	3.5
Media	48.0		49.54		61.5		84.23	

Tabla 10. Resultados de las resistencias a compresión a diferentes edades. (MPa)
 Table 10. Final results of the resistance to compression to different ages (MPa)

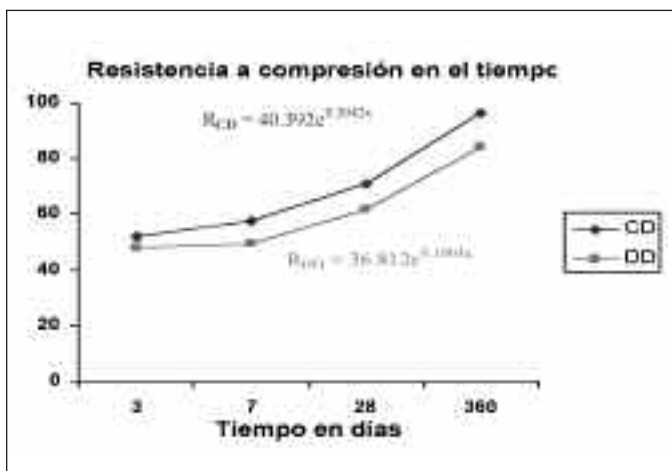


Fig. 7. Resistencia a compresión en el tiempo
 Fig. 7. Resistance to compression in the time

te, en él, se observan transformaciones de forma radial que se deben a la reacción puzolánica. En el mapping puede verse la variación de las concentraciones de Si, Ca y Al. La zona central corresponde a la de un Silicato aluminoso de Na, K, y Ca es decir la zeolita, En el primer halo se define la formación de un silicato cálcico con algo de aluminio y por último y ya muy homogéneo con los productos de hidratación del cemento, el silicato cálcico.

Conclusiones

- La caracterización de la zeolita demuestra que cumple los requisitos para ser usada como puzolana. Siendo mejor su comportamiento molida menor de 74 μm que bajo 1 mm.

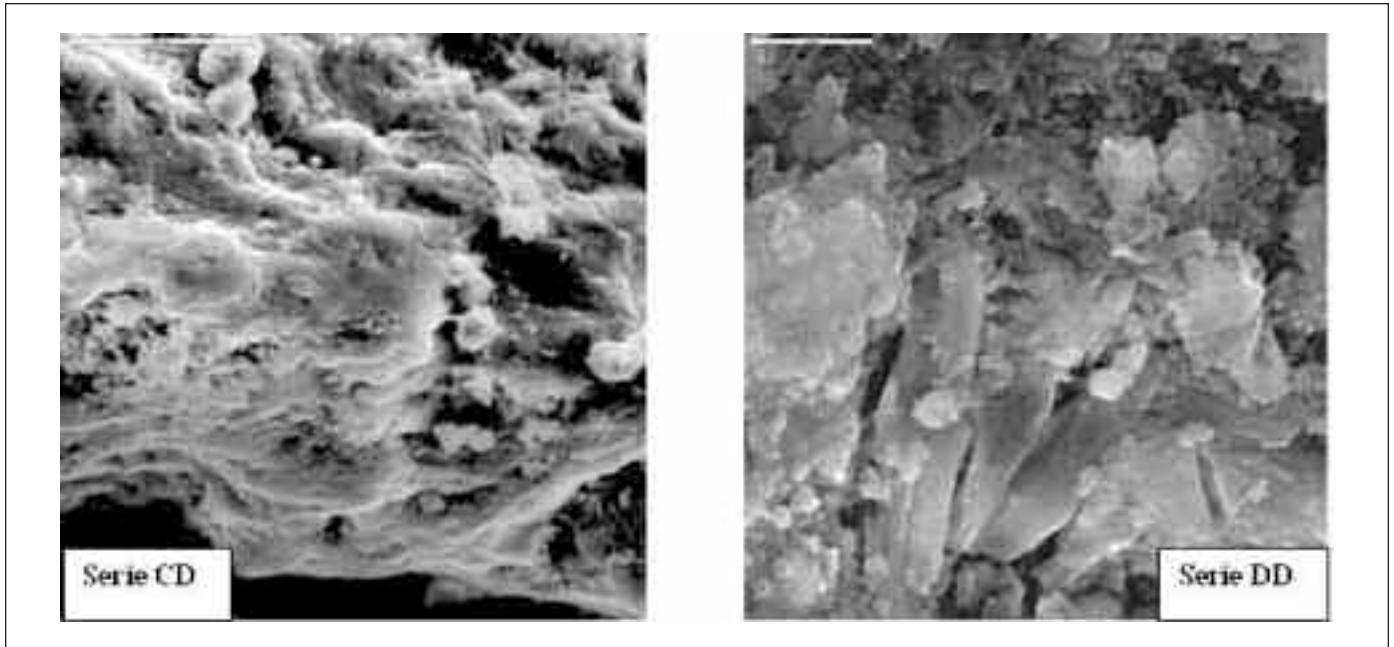


Fig. 8. Micrografía de la interfase árido-pasta de hormigones a la edad de 1 año. Lab. CCMA. CSIC. Madrid
Fig. 8. Micrography of the concretes aggregate-paste interface 1 year of age. CCMA. Lab. CSIC. Madrid

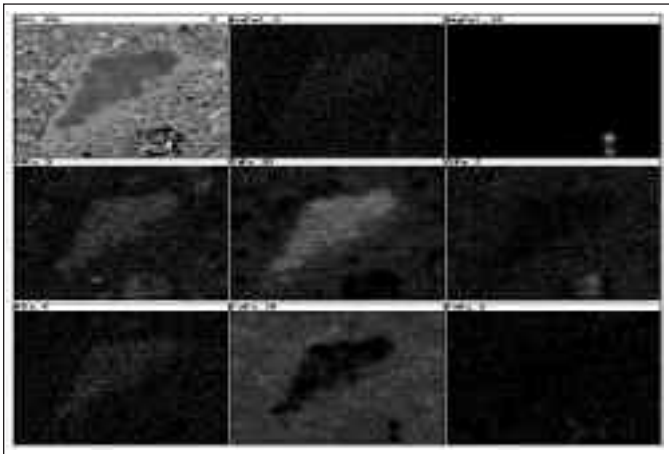


Fig. 9. Cartografía de un grano de zeolita en hormigones a la edad de 1 año. Lab. CCMA. CSIC. Madrid
Fig. 9. Mapping of a grain of zeolite in concretes at 1 year of age

viendo un aumento de este comportamiento en el tiempo, tal y como es característico de las reacciones puzolánicas. El comportamiento de la resistencia lo caracteriza un modelo exponencial que en el caso de adición de zeolita muestra una mayor pendiente.

- Las micrografías de la interfase árido pasta de los hormigones demuestran las variaciones morfológicas dadas por la homogeneidad de los silicatos cálcicos y formación de cristales de portlandita menos agudos, en aquellos donde hay presencia de zeolita.
- La utilización de la zeolita como adición puzolánica ha permitido lograr hormigones de Altas Prestaciones, cuyos resultados al año alcanzan los 96 MPa.

Referencias

- La actividad puzolánica de la zeolita Tasajeras se demuestra mediante los análisis de difracción de Rayos X en el tiempo y es confirmada por las micrografías donde se observa claramente la transformación de un grano de zeolita en la masa del hormigón.
- En los hormigones con adición de zeolita se desarrollaron mayores resistencias a compresión,

- ACI. 2000. 363R-92. State of art in high strenght concrete. Part 1. *Association Concrete International*. Manual Concrete Practice.
- ACI. 2002. Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. *Association Concrete International*. Comité 232.
- Gayoso, R. y Rosell, M. 2003. Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones. *V Conferencia Internacional de zeolita*. Universidad de la Habana.

- Gayoso, R and Gil, C. 1994. Cracking Avoidance in Ferrocement using Natural Zeolite Aggregates. *Ferrocement. Proceedings of the 5th International Symposium on Ferrocement*. UMIST. Manchester.
- Gayoso, R., Sotolongo, C., Gil, C. and Prado, R. Curing and Pozzolanic Activity in Polymer Modified Mortars. *Proceedings of the 6^h International Conference*. Omiya, Japan.
- Liborio, J. B., da Silva, I.J. y de Melo A. B. 2002 SEM Análisis of paste-aggregate interface in concrete, containing silica fume. *Proceedings 3th Internacional Conference Recife, PE, Brazil*.
- Mehta, P.K. 1987. *Natural Pozzolans. Supplementary Cementing Materials for concrete*. Editor Malhotra, V. M. Ottawa, Canada.
- Rabilero, A. 1988. *Las puzolanas. Cinética de las reacciones*. Editorial Oriente. Santiago de Cuba.
- Urrutia, F. y Gener, M. 1991. *Memorias 3^{ra} Conferencia Internacional sobre ocurrencia y usos de las zeolitas naturales. Zeolites'91*. La Habana.

Recibido: Julio 2005

Aceptado: Julio 2006