

Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones.

Ing. Mercedes Rosell

Dr. Arq. Regino Gayoso Blanco

Dr. Ing. Benjamín Calvo Pérez

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

A los fines de la construcción, y de acuerdo al Comité 232 de la ACI (Association concrete Internacional)(1) las puzolanas naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silícea ó sílico-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 (2).

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.(3)

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.(4)

Los trabajos de Mehta, Rabilero, Urrutia, Prado, Gayoso y Sotolongo (5, 6, 7) 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, Gil, (8) comenzaron los estudios de utilización de la zeolita como árido ligero en los hormigones, con resultados empíricos satisfactorios. La construcción de cinco barcos de 8.0, 13.0 y 16.0 m de eslora bajo la concepción de obtener un aligeramiento en el hormigón fue logrado, obteniendo un peso volumétrico del hormigón 1850 Kg/m^3 .

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.

En el año 1997 Gayoso y Rosell (9) llegan 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 realizadas 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.

1.0 Materiales. Caracterización.

1.1 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 No1 y No 2.

Tabla No.1 Cemento Portland Mariel. Composición Físico-química. Laboratorio CTDMC.

Propiedades	Muestra No.1	MuestraNo.2	Media
C ₃ S	45	60	52.5
C ₃ S	17	12	14.5
C₃A	7.7	7.92	7.8
C ₄ AF	9.5	9.68	9.6
Blaine cm/g ²	3382	3408	3395
Peso Especifico	3.12	3.12	3.12
Pérdida por Ignición%	2.62	2.53	2.57
Residuo Insoluble %	2.51	1.11	1.81

Table No.2 Cemento Portland Mariel. Resistencia a Compresión (MPa). Laboratorio CTDMC

Edad (días)	Muestra No.1	Muestra No.2	NC:54:205:80
3 d	25.1	25.3	17.5
7 d	30.8	31.3	25.0
28 d	41.1	40.3	35.0

1.2 Agregados

Los agregados utilizados son:

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

Tabla No 3. Caracterización química realizada por Fluorescencia. Laboratorio Escuela de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.

	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 No 4 Agregados. Propiedades Físico- Mecánica Laboratorio CTDMC.

Ensayo	Unidad	Arena DC	Granito DC	Gravilla DC
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
Vacíos	%	34	42	40
Abrasión. L. Angeles	%	-		20.3

La distribución granulométrica de los agregados aparece en la tabla No 5.

Tabla No 5. Distribución granulométrica de los Agregados. Laboratorio CTDMC.

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

1.3 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

1.4 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 5.

Tabla No 6. Zeolita Tasajeras. Análisis químico realizado por Fluorescencia. Laboratorio Escuela de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.

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

El derivatograma de esta zeolita se muestra en la figura No 1, donde aparecen los efectos típicos de la clinoptilolita y la heulandita.

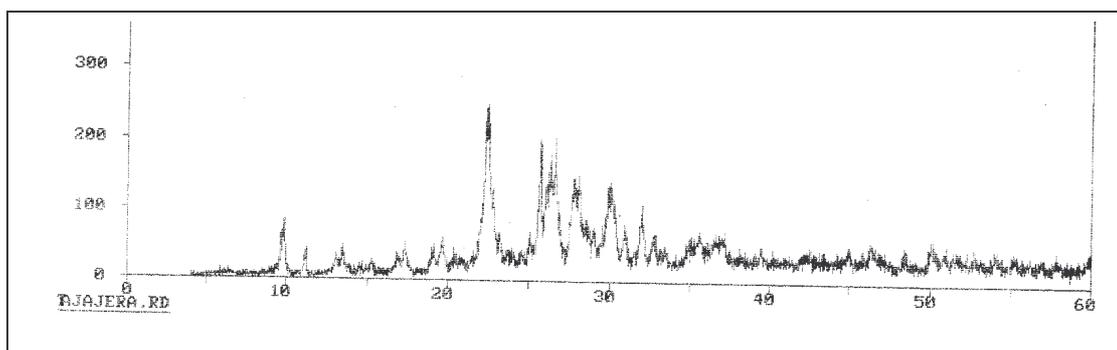
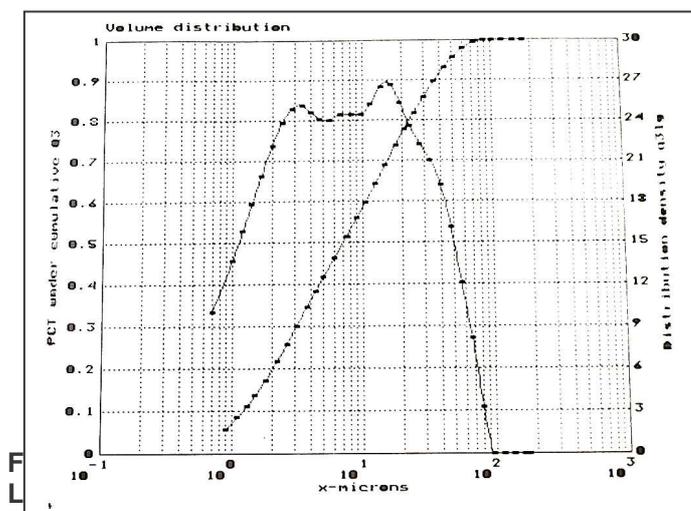


Figura No 1. Derivatograma de la zeolita del yacimiento Tasajeras. Laboratorio Escuela de Minas. Universidad Politécnica de Madrid

La zeolita molida en molino de bolas durante una hora, obtuvo como característica la granulométrica la que aparece en la figura 2.



$D_{50} = 7,07 \mu\text{m}$
 $D_{90} = 36,69 \mu\text{m}$
 Tamaño máximo: $103 \mu\text{m}$
 Superficie esp. (BET): $56,37 \text{ m}^2/\text{g}$
 Superficie esp. (Blaine): $15\ 458 \text{ cm}^2/\text{g}$

Figura 2: Granulometría láser de la zeolita. Laboratorio IETcc. CSIC. Madrid

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

Tabla No 7. Resultados de la actividad puzolánica de la zeolita Tasajeras, por diferentes métodos

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.	Indice 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

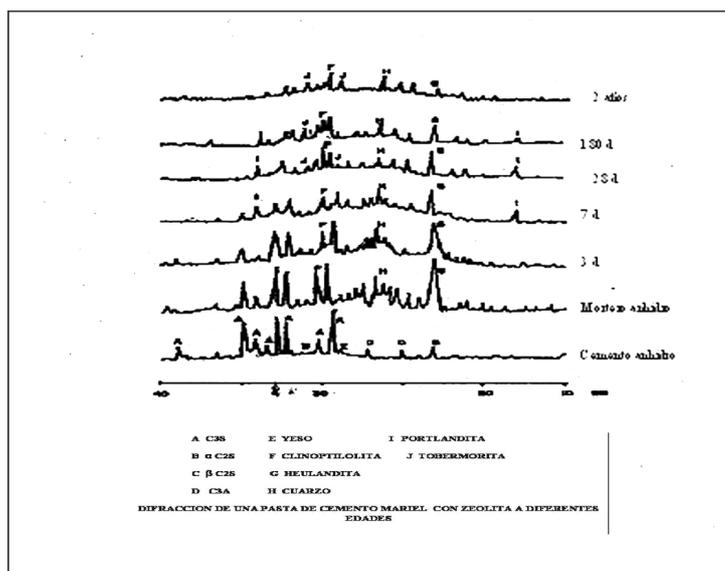


Figura No 3. Difracción de Rayos X de una pasta de cemento con adición de zeolita a diferentes tiempos. Laboratorio CTDMC.

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.

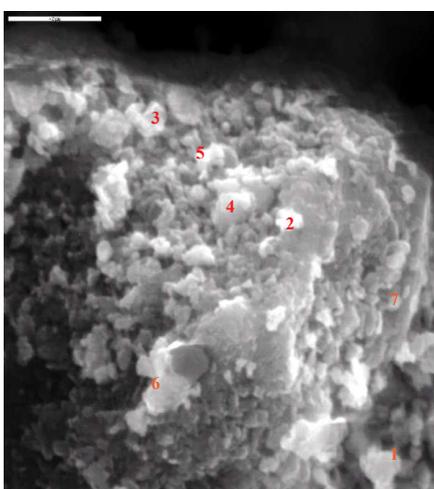
En la figura No 3, se puede observar:

- 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 mas 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.

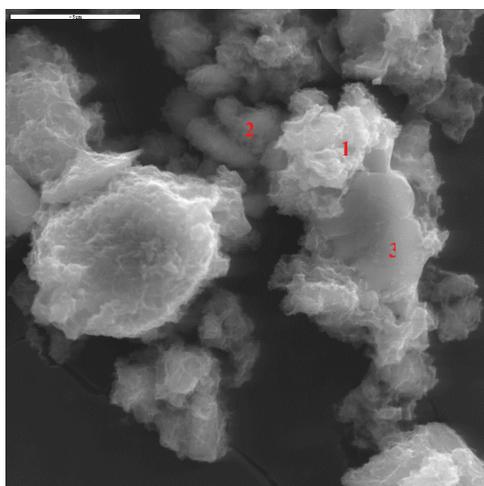
Otra evidencia de la reacción puzolánica de la zeolita se obtuvo utilizando la Microscopía Electrónica de Barrido. En primer término se observó la morfología de la zeolita del yacimiento Tasajeras, figura No 4, Se destacan en ella granos prismáticos y granos mas redondeados, que fueron diferenciados químicamente en los sondeos, apreciandose relaciones Si/Al muy diferentes y que de acuerdo al reporte del subcomité de zeolitas de la Internacional Mineralogical Assotiation (13) ello, corresponden a heulandita y clinoptilolita, aspecto este, que es profundizado en los estudios presentes.



P R I S M A S	Puntos	Si/Al
	1	2.029
	2	1.862
	3	2.12
	Media	2.09
R E D O N D A S	4	4.52
	5	5.19
	6	4.87
	7	5.14
		Media

Figura No 4. Micrografía de la zeolita natural.
Lab. CCMA. CSIC. Madrid

Comparando la morfología de una zeolita después de una reacción de 7 días de reacción en una solución sobresaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, figura No 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).



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

Figura No 5. Micrografía de la zeolita después de reacción con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Lab. CCMA. CSIC. Madrid

3.0 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 No 8 y en la figura 6, se puede observar la distribución y su correlación con Fuller. (14)

Tabla No 8. Dosificación de los áridos. Método de cálculo: Software Mezcla CTDMC

Tamiz (mm)	Agregado. Por ciento 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

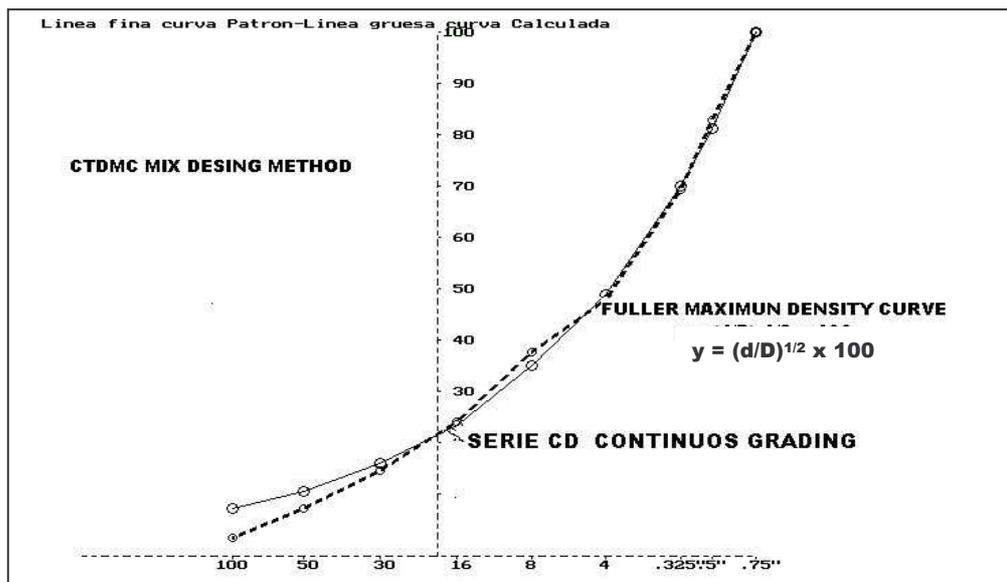


Figura No 6. Curva del diseño de los áridos según Mezcla CTDMC.

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 No. 9. Se conformaron probetas 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

Tabla No 9 Dosificación para los hormigones de altas prestaciones.

Series	Cemento kg/m ³	Aggregates			Zeolita kg/m ³	Aditivo Quimico l/m ³	Agu a l/m ³	A/C + Z	Asent. mm
		Arena kg/m ³	Granit okg/m ³	Gravill a 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

4.0 Discusión de resultados.

Los resultados de las resistencias a los diferentes tiempos e reportan en la tabla No 10.

Tabla No 10. Resultados de las Resistencias a Compresión a diferentes edades. (MPa)

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	

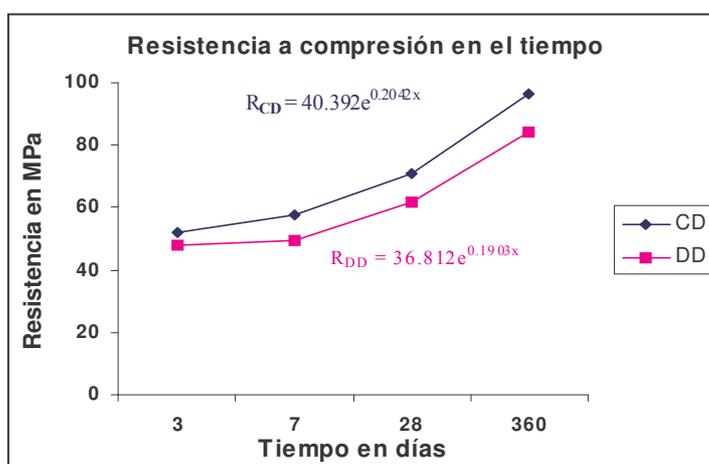
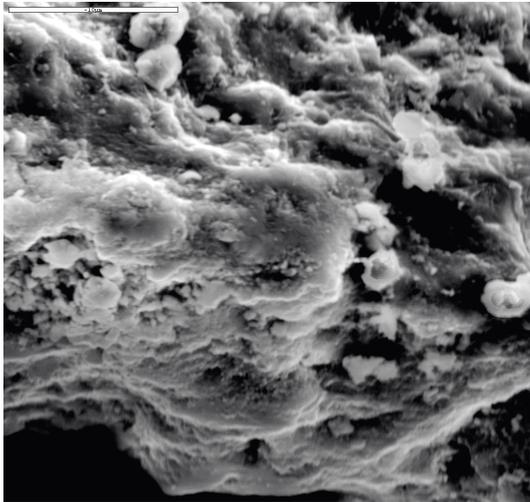


Figura No 7. Resistencia a compresión en el tiempo

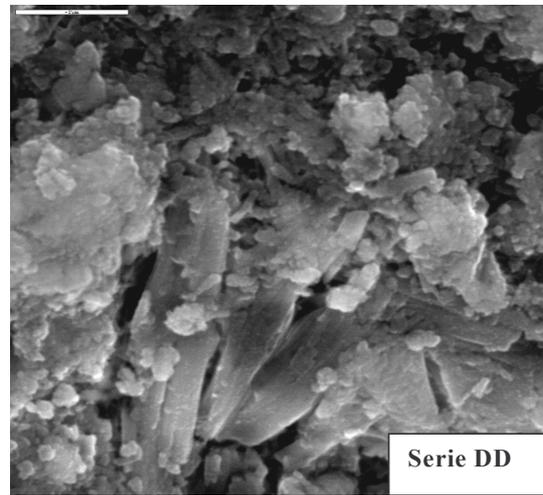
Se observa que a la edad de 3 días ya hay un incremento discreto de la resistencia a compresión, el incremento mas pronunciado de la resistencia a compresión se observa a partir de los 28 días, llegando a 12 MPa a la edad de un año. En la figura No 7 se aprecia que el aumento de las resistencias se caracteriza por un modelo exponencial donde, la serie CD tiene una mayor pendiente, incrementando en el tiempo la 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 las reacción puzolánica, (Figura No 8,) 15 micras.



(8a) Interfase de la muestra CD



(8b) Interfase de la muestra DD

Figuras No 8a y 8b. Micrografía de la interfase árido-pasta de hormigones a la edad de 1 año. Lab. CCMA. CSIC. Madrid

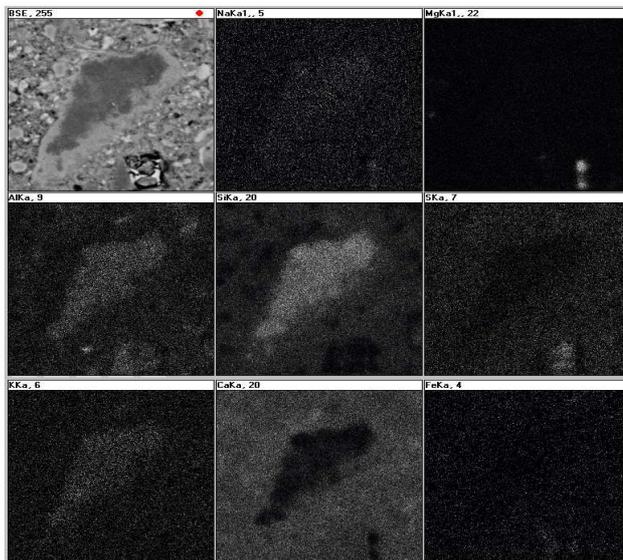


Figura No 9. Mapping de un grano de zeolita en hormigones a la edad de 1 año. Lab. CCMA. CSIC. Madrid

Como los estudios similares llevado a cabo por otros investigadores como el Liborio et al.(15) 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, figura No. 9. Se

pudo definir un grano de zeolita de 48 μm , aún sin reaccionar completamente, 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 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 ultimo y ya muy homogéneo con los productos de hidratación del cemento el silicato cálcico.

5.0 Conclusiones

1. La caracterización de la zeolita demuestra que cumple los requisitos para ser usada como puzolana. Siendo mejor su comportamiento molida menor de 74 μ m que bajo 1 mm.
2. 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.
3. En los hormigones con adición de zeolita se desarrollaron mayores resistencias a compresión, viendo un aumento de este comportamiento en el tiempo, tal y como es característico de las reacciones puzolánicas. El comportamiento de las resistencia lo caracteriza un modelo exponencial que en el caso de adición de zeolita muestra una mayor pendiente.
4. Las micrografías de la interfase árido pasta del los hormigones demuestran la 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.
5. La utilización de la zeolita como adición puzolánica ha permitido lograr hormigones de Altas Prestaciones, cuyos resultados al año alcanzan los 96 MPa.

6.0 Bibliografía.

1. Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. ACI. Comité 232.2002
2. La Luz, A. B. Zeolitas: Propiedades e usos industriais. Serie tecnologica 68. CETEM. Rio de Janeiro. 1995.
3. Giannetto P; Montes A; Rodríguez G. Zeolitas. Características, propiedades y aplicaciones industriales.
4. Rabilero A. Las puzolanas. Cinetica de las reacciones. Editorial Oriente. Santiago de Cuba. 1988.
5. Urrutia F; Gener M. Memorias 3^{ra} Conferencia Internacional sobre ocurrencia y usos de las zeolitas naturales. Zeolites'91. La Habana, 1991.
6. Mehta P.K. Natural Pozzolans. Supplementary Cementing Materials for concrete. Editor V M. Malhotra. Ottawa Canada. 1987.
7. Gayoso, R. Sotolongo, C. Gil y R. Prado Curing and Pozzolanic Activity in Polymer Modified Mortars. Proceedings of the Sixth International Conference held in Omiya Japan . 1993
8. Gayoso, R; C. Gil Cracking Avoidance in Ferrocement using Natural Zeolite Aggregates. Ferrocement. Proceedings of the Fifth International Symposium on Ferrocement .UMIST, Manchester, 6-9 September 1994.
9. Gayoso R. Rosell M. Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones. V Conferencia Internacional de zeolita. Universidad de la Habana, Marzo 2003.
10. NC 54-205:98. Especificaciones de calidad de cemento.
11. ASTM C 494
12. ASTM C 311/97 Standard Test methods for sampling and testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral admixture in Portland Cement Concrete .
13. Cooms D. S et al. Recommended nomenclatura for zeolite minerals. Report of the subcomité on zeolitas of the internacional Mineralogical Association. Commisison on new minerals and minerals names. 1998.
14. ACI 363R-92 State of art n high strenght concrete. Part 1. ACI Manual Concrete Practice 2000.
15. Liborio J. B, da Silva I.J, de Melo A. B. SEM Análisis of paste –aggregate interface in concrete, containing silica fume. Proceedings Third Internacional Conference Recife, PE, Brazil, 2002.
16. ASTM C 593/95 Standard specification for flay ash and other pozzolans for use with lime

Agradecimientos especiales a:

Dr. Ing. Carmen Vizcaino y Dr. Ing, Ricardo Castelló del Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid. España.

Ing. Mercedes Rosell
Centro Técnico para el Desarrollo
de los Materiales de Construcción.
Ciudad de la Habana. Cuba.
Email: mercedesr@yahoo.es
cachiu@cubarte.cult.cu

Dr. Arq. Regino Gayoso Blanco
Centro Técnico para el Desarrollo
de los Materiales de Construcción.
Ciudad de la Habana. Cuba.
Email: gayoso@ctdmc.com.cu

Dr. Ing. Benjamín Calvo Perez
Escuela de Minas .
Universidad Politecnica de Madrid
Email: benjamín_calvo@yahoo.es