

## **INFLUENCIA DE LA ADICION DE ZEOLITA EN LAS PROPIEDADES MICRO Y MACROESTRUCTURALES EN PASTAS Y MORTEROS**

**Mercedes B. Rosell Lam<sup>(1)</sup>; Jorge L. Costafreda Mustelier<sup>(2)</sup>; José Luis Parra y Alfaro<sup>(2)</sup> y Benjamín Calvo Pérez<sup>(2)</sup>.**

*(1)Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción. Ciudad Habana, Cuba (mercedesr@ctdmc.co.cu); (2)Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid, (costafreda@yahoo.es); (joseluis.parra@upm.es) y (benjamin.calvo.perez@gmail.com).*

### **RESUMEN**

Las adiciones activas en los hormigones son cada día más usuales, no solo debido a razones económicas, sino porque los efectos que se desarrollan son beneficiosos para las prestaciones del hormigón, léase durabilidad y resistencias mecánicas. En Cuba ha sido frenada al no existir fuentes como las tradicionalmente conocidas y comercializadas como es cenizas volantes y las micro sílices (silica fume o fly ash).

El desarrollo de estudios de algunos minerales industriales nacionales de génesis ígnea como los vidrios volcánicos, tobas vítreas o zeolitas han demostrado su actividad puzolánica. Es conocido que la zeolita tiene actividad puzolánica desde la época romana, y actualmente se utilizan en el mundo para la producción de cementos mezclados, sin embargo la experiencia cubana es el precedente de su uso como adición activa a hormigones.

Se han realizado investigaciones a diferentes escalas del uso de adiciones de zeolita en tecnologías de prefabricado, premezclado y pretensado que han demostrado las mejoras en las prestaciones.

El presente trabajo explica el aumento de las prestaciones antes demostradas mediante el estudio de los cambios microestructurales, tanto de composición química como en la morfología de los productos de hidratación formados, a partir de análisis por microscopia electrónica de barrido y microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X en pasta de cemento y cemento + zeolita comparativamente.

### **ABSTRACT**

The use of mineral admixture in concretes have been increased all over the world, because To improve the properties of concrete (highly mechanical strength and resistant to environmental effects) economically.

In Cuba there is not sources of mineral admixture such fly as or silica fume, then the researcher has showed the pozzolanic activity of some minerals as the volcanic glasses, vitreous tuffs or zeolites.

From the roman time have been known the zeolites as puzzolanic materials, and up to date, it is used in several countries for the blended cements production, however the first experience as mineral admixture in concretes was in Cuban. It was studies in different concrete technologies with excellent result referred to performance.

This work explains the increase of performances with the zeolites use as mineral admixture by the study of the of chemical composition, the morphology changes of the hydration products formed by Scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometer microanalysis in cement and cement + zeolite paste and mortar.

## INTRODUCCIÓN

Las adiciones activas en los hormigones son cada día más usuales, no solo debido a razones económicas, sino por que los efectos que se desarrollan son beneficiosos para las prestaciones del hormigón, léase durabilidad y resistencias mecánicas.

En Cuba, al no existir fuentes como las tradicionalmente conocidas y comercializadas y que se encuentran referidas en las normas internacionales como es cenizas volantes y las micro sílices (silica fume o fly ash), la generalización del uso estas adiciones se ha visto limitada a las producciones de cementos mezclados, utilizando para ello tobas zeolitizadas de las cercanías de las plantas de producción de cemento, como por ejemplo el uso de las tobas Las Carolinas de Cienfuegos en la fabrica Carlos Marx de esta localidad. Bajo este enfoque, producción de cementos mezclados llegó en año 1989 a más del 40% de la producción total del cemento del país. (Urrutia 1991, Gener 1984).

Igualmente se ha demostrado mediante diversas investigaciones las prestaciones y su resistencia al intemperismo mediante ensayos a largo plazo utilizando para ello técnicas electroquímicas, químicas y físico mecánicas, como es el caso de la resistencia a los cloruros, la carbonatación en el tiempo, la resistividad en los aceros de refuerzo, la permeabilidad y la resistencia mecánica en hormigones con este tipo de cemento. (Martínez Ramires 2006, Martín Acosta 2005).

No obstante el desarrollo de estudios de algunos minerales industriales de génesis ígnea como los vidrios volcánicos, tobas vítreas o zeolitas han demostrado su actividad puzolánica (Rabilero 2005, Gayoso 2004, Rabilero 1988).

Aunque se conoce que la zeolita tiene actividad puzolánica desde la época romana, y actualmente Grecia y Japón publican su uso en cementos e incluso China reporta el uso de más de 30 millones de toneladas año para la producción de cementos, las referencias de uso de la zeolita como adición activa a hormigones aparece como primicia la experiencia cubana. Se han realizado investigaciones a diferentes escalas del uso de adiciones de zeolita en tecnologías de prefabricado, premezclado y pretensado que han demostrado las mejoras en las prestaciones. (Poon, Gayoso 2006, Rosell 2004).

Han sido ampliamente estudiados y divulgados resultados obtenidos en la durabilidad de los morteros y hormigones con adiciones activas como las cenizas volantes y las micro sílices, así como aquellas obtenidas por procesos térmicos como la ceniza de cascara de arroz, el metacaolin o cenizas de desechos agrícolas )ACI 2000, Zhang 1996, Pepper)

Las adiciones minerales activas en una pasta de cemento, produce modificaciones en la composición de las fases fundamentales que se forman, por su interacción con los productos de hidratación del cemento. Se ha demostrado, mediante estudios de microscopia electrónica (SEM) con la técnica de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) asociada, las diferencias en la composición química de los productos de hidratación formados en pastas con adiciones activas y solo cemento, evidenciando también que la composición de estos productos de hidratación, depende también de la composición de la puzolana utilizada.

Diversos autores formulan que estas diferencias hacen aportes a la durabilidad y de manera resumida tiene los siguientes efectos:

- Los silicatos producto de la reacción puzolánica (la tobermorita) aporta resistencia mecánica adicional, lo cual constituye un incremento referido a los cementos u hormigones sin dosificar (Taylor 1990, Ramachandran 2001).

- la tobermorita se deposita en los poros y microporos del hormigón lo que refina y disminuye la conectividad entre ellos, provocando una mayor impermeabilidad y resistencia al ataque del intemperismo, de los sulfatos y del agua de mar (iones cloruros) (Mehta 2001).

- de igual modo ocurre una disminución del calor de hidratación disminuyendo con ello los riesgos de cracking térmico. (Pepper).

- los productos de hidratación que se forman son menos cristalinos y su morfología es menos acicular y mas densa lo que su compacidad y disminuye su reactividad ante agentes externos (Larbi 1998).

- disminuye y controla la presencia y morfología de la portlandita, mejorando la adherencia árido pasta y disminuyendo la reactividad en la interface (Liborio 2002).

Los estudios de durabilidad de los hormigones con adiciones de zeolita han evaluado y demostrado los incrementos de resistencia, disminución de la permeabilidad, la absorción por capilaridad y el pH en el tiempo en comparación con hormigones sin adiciones (Gener 2001).

El presente trabajo tiene como objetivo explicar el aumento de las prestaciones antes demostradas mediante el estudio de los cambios microestructurales, tanto en composición química como en morfología de los productos de hidratación formados, estudiando para ello pasta de cemento y cemento + zeolita comparativamente.

De igual modo se evalúan las resistencias mecánicas, la absorción capilar a las edades de 3, 7 y 28 días en morteros donde además se estudia comparativamente la morfología y composición micro estructural en la interface árido pasta de manera que se expliquen el incremento de las prestaciones.

## **MATERIALES Y MÉTODOS.**

Para evidenciar que los efectos de la adición de zeolita en hormigones son consecuencia de los productos formados en la reacción puzolánica y su morfología se diseña un experimento en el que se preparan pasta y mortero, uno de cemento solamente y otra con sustitución del 30 % de zeolita.

Se utilizó un Microscopio electrónico de Barrido (SEM), marca Philips, modelo XL 30 asociado a un equipo para microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) que trabaja a 20 Kv, con alto vacio a base de electrones secundarios.

### Preparación de las pastas y morteros.

Las pastas se prepararon teniendo con relación agua cemento para alcanzar una fluidez de 110 mm en mesa de sacudidas. En el caso de pasta cemento + zeolita se sustituyó el 30% en volumen del cemento por zeolita teniendo en cuenta las diferencias de densidades.

Para los morteros se utilizó arena normalizada EN 196-1 y el mismo criterio de relación agua cemento que en las pastas. El mortero de cemento + zeolita tiene un 30% de sustitución de cemento por zeolita en volumen, considerando las diferencias de densidades.

Caracterización de los materiales.

El cemento utilizado para la experimentación es identificado como cemento Mariel. Su caracterización aparece en las tablas y gráficos siguientes.

Tabla I. Composición química del Cemento Mariel.

Oxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	PPI	RI	Cal Libre
% masa	19.65	4.66	60.68	2.52	3.54	3.03	2.96	0.81	1.7

Tabla II. Composición mineralógica del Cemento Mariel

Fase	UM	Cemento
Silicato tricalcico (C3S)	%	<b>54.14</b>
Silicato dicálcico (C2S)	%	15.49
Aluminato tricalcico (C3A)	%	<b>8.08</b>
Ferrito aluminato tricalcico (C4AF)	%	7.66

Tabla III. Resultados de los Ensayos Físicos del Cemento Mariel.

Ensayos	U/M	Cemento
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3712.37
Peso Específico	g/cm <sup>3</sup>	3.12
Consistencia normal	%	24.2
Fraguado inicial	min	112
Fraguado final	h:min	3:05

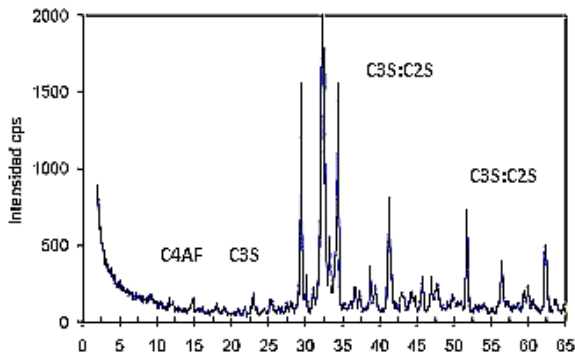


Figura 1. Diffractograma de cemento Mariel

Tabla IV. Resultados de las ensayos mecánicos del Cemento Mariel.

Edades (días)	Resistencias en MPa	
	Flexión	Compresión
3	4.4	15.1
7	5.3	22.6
28	6.6	38.8

La zeolita utilizada para el estudio es del yacimiento Tasajeras. Fue previamente molida y homogenizada. Los resultados de su caracterización aparecen en las tablas y gráficos subsiguientes.

Tabla V. Composición química de la zeolita Tasajeras.

Oxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPI
% masa	64,39	11,76	3,64	1,96	1,47	1,29	0,61	0,31	14,57
Error Std	0.53	0.36	0.1	0.15	0.12	0.13	0.086	0.028	

Tabla VI. Propiedades físicas de la zeolita Tasajeras.

BLAINE	BET	Microporosidad	Ø medio
cm <sup>2</sup> /g	m <sup>2</sup> /g	cm <sup>3</sup> /g	µm
9683	44	0.066	48

Tabla VII. Resultados del cumplimiento de requisitos químicos de idoneidad de la zeolita Tasajeras como aditivo mineral activo según norma ASTM C 618.

Características	Zeolita Tasajera	Clasificación Mineral		
		N	F	C
Suma de óxidos, SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % min	78.11	70	70	50
SO <sub>3</sub> % max	0.005	4	5	5
Pérdida por ignición % max	14.57	10	6	6
Álcalis. Equivalente Na <sub>2</sub> O % max	1.47	1. 5	1.5	1.5

Tabla VIII. Resultados del cumplimiento de requisitos físicos de idoneidad de la zeolita Tasajeras como aditivo mineral activo según norma ASTM C 618.

Requerimientos físicos (ASTM C 618 -92a)		Zeolita Tasajera
Finura %. Retenido tamiz 45 µm (% max)	34	43.26
<b>Índice de Actividad. Cemento Pórtland min</b>		
Edad 7 días. % mín del mortero s/ adición	75	76.36
Edad 28 días % mín del mortero s/adición	75	94.54

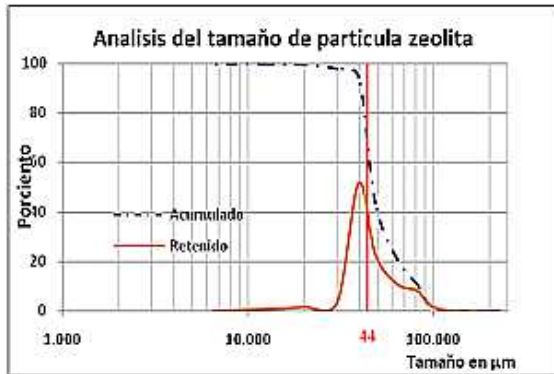


Figura 2. Distribución granulométrica de la zeolita Tasajeras

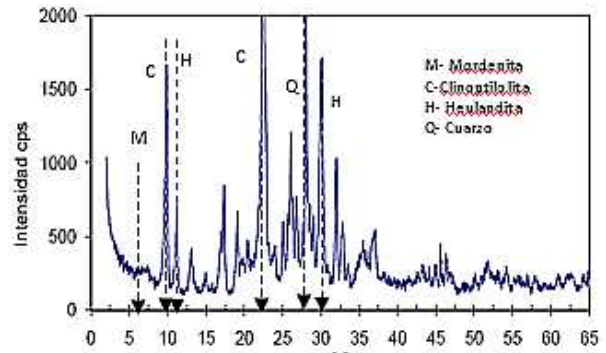


Figura 3. Difractograma de zeolita Tasajeras

## RESULTADOS

Resultados del análisis micro estructural de las pastas a diferentes edades.

A la edad de 3 días (figura 4)

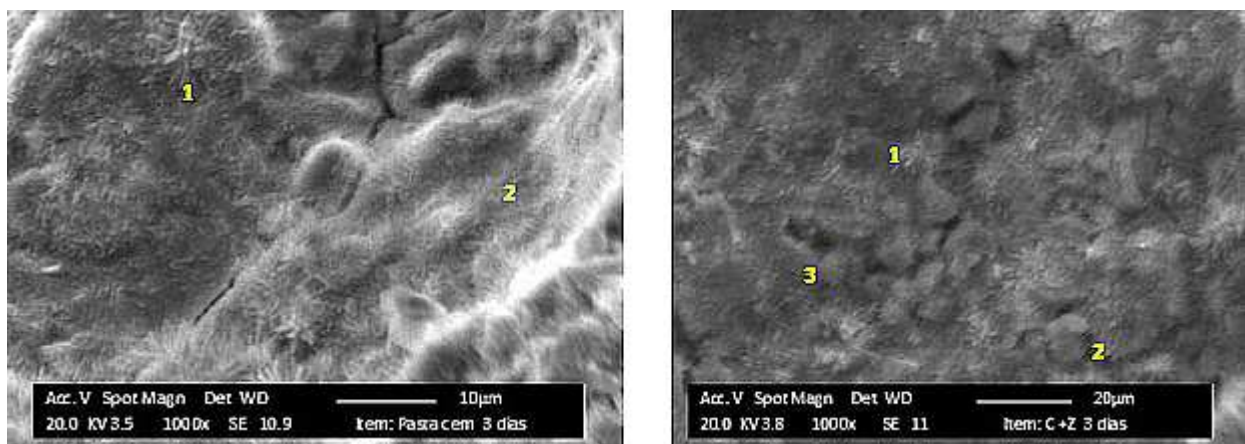


Figura 4. Micrografías de pastas a 3 días. (Derecha cemento, izquierda cemento + zeolita)

Se observa en la pasta de cemento formaciones incipientes de productos de hidratación silicatos cálcicos hidratados, en forma acicular (fibrillas finas) recubriendo los granos de

manera homogénea. En el caso de la pasta de cemento con zeolita las formaciones fibrosas no son continuas formando pequeños ramilletes.

De acuerdo a las relaciones másicas obtenidas de los microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) de los puntos señalados en las micrografías, los silicatos cálcicos formados no presentan variabilidad significativas en su composición.

#### A la edad de 7 días (figura 5)

Se ha tomado para analizar zonas donde aparece un poro por agua o aire. En ambos casos la formación de gel de tobermorita es mayor y mas densa que en las micrografías que a la edad de tres días.

En la pasta de cemento el gel de CHS se ha formado en capas y con formas mas angulosas. Lo contrario se aprecia en la pasta de cemento + zeolita, donde los productos de hidratación (CHS) son continuos, masivos y de forma redondeada. Por los EDX y relaciones másicas, se identifica un cristal de portlandita (punto 1) dentro del poro de la pasta de cemento, la cual tiene forma de cristales hexagonales muy angulosos en dirección perpendicular a la formación del gel.

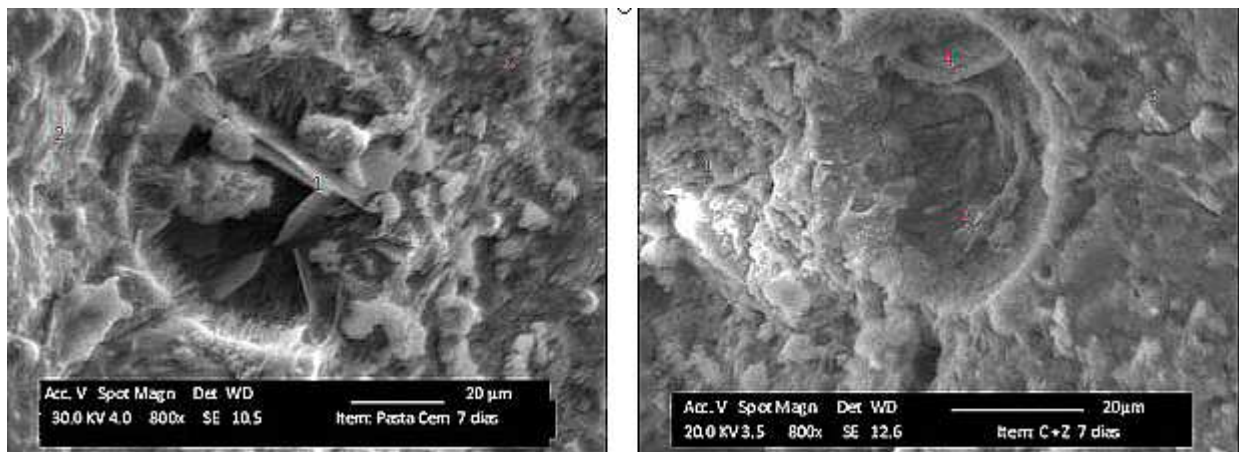


Figura 5. Micrografías de pastas a 7 días. (derecha cemento, izquierda cemento + zeolita)

De igual modo se identifica en el fondo del poro de la pasta de cemento + zeolita que hay formación de gel de aluminosilicatos hidratados de calcio (por relación Al/Ca), comenzando a rellenar el mismo (punto 2). Se reconoce cristal de portlandita (punto 4) formado dentro del poro en la misma dirección del gel, presumiblemente ya en disolución al estar rodeado por productos de hidratación.

#### A la edad de 28 días( figura 6 y 7)

La pasta de cemento a 28 días presenta una morfología granulosa pero con formaciones aciculares; en algunas zonas se observa un aspecto escamoso cubierto por pequeñas fibras. La formación acicular más gruesa en forma de flor, (punto 3) se identifica como ettringita, por el contenido la relación S/Ca. En el detalle se observa que se ha formado en una coquedad de productos de hidratación, por lo cual se infiere que es de segunda generación.

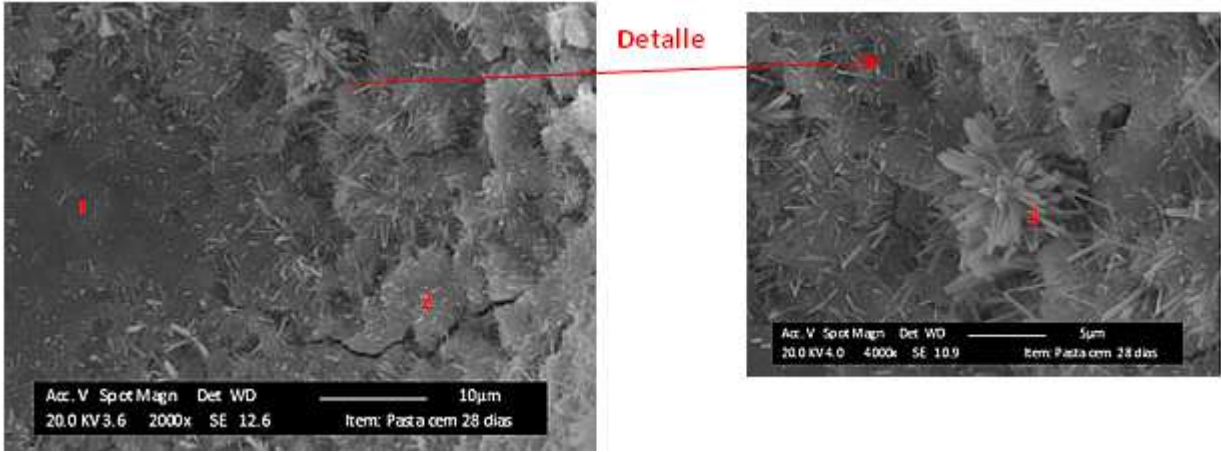


Figura 6. Micrografías de pastas de cemento a 28 días

Los silicatos hidratados no son del todo homogéneo lo cual se corresponde con las diferencias morfológicas expresadas corroborando que existen diferencias estequiométricas de estos productos en las relaciones Si/Ca.

En la pasta de cemento + zeolita se observa crecimiento de nuevas fibras de productos de hidratación por debajo del gel, siendo la morfología bastante homogénea semejante a formaciones coloidales, de aspecto escamoso.

Esta homogeneidad se corrobora en las relaciones másicas (ver Tabla IX), de los puntos analizados (puntos 1, 2 y 3), en los que el CHS tiene semejantes relaciones Ca/Si, siendo en todos los casos del tipo amorfo ( $Ca/Si \geq 1,5$ ) y diferente estequiométricamente al formado en la pasta de cemento solo.

En el caso del punto 4, crecimiento por debajo del gel, el detalle demuestra un crecimiento muy denso de pequeñas agujas con inserciones de esférulas que está rellenando los micro poros formados, lo que proporciona una mayor compacidad al gel; por los contenidos de Al y Ca del EDX se identifica como aluminato cálcico hidratado.

Por similitud morfológica, la mayoría de los productos de reacción que se observan en esta micrografía y otros microanálisis no reportados en este trabajo, se consideran aluminato cálcico hidratado.

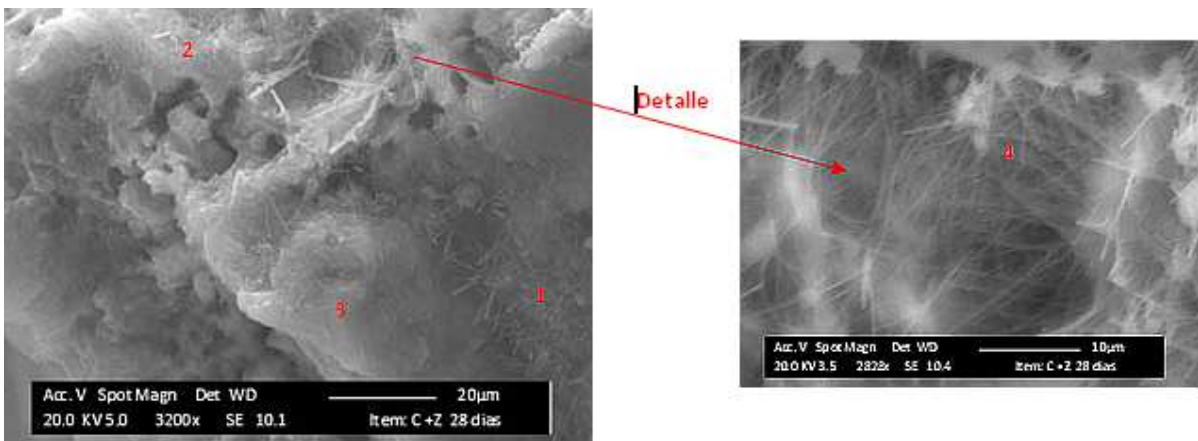


Figura 7. Micrografías de pastas de cemento + zeolita a 28 días



Tabla IX. Relaciones según las masas molares de los productos de reacción de las pastas, obtenidas por Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX).

Pasta Cemento					
Edad	Nº	Si/Ca	Al/Ca	Ca/Si	Si/Ca
3 días	1	0.002	0.083	0.786	1.272
	2	0.013	0.141	0.563	1.775
7 días	1	0.000	0.016	28.94	0.035
	2	0.011	0.087	1.559	0.642
	3	0.012	0.169	0.363	2.753
28 días	1	0.002	0.039	1.674	0.597
	2	0.008	0.064	0.546	1.831
	3	0.326	0.190	3.298	0.303

Pasta Cemento + zeolita					
Edad	Nº	Si/Ca	Al/Ca	Ca/Si	Si/Ca
3 días	1	0.019	0.075	0.849	1.178
	2	0.003	0.073	0.841	1.189
	3	0.001	0.062	0.808	1.238
7 días	1	0.034	0.081	0.585	1.711
	2	0.084	0.271	0.613	1.632
	3	0.016	0.087	0.967	1.034
	4	0.000	0.012	30.88	0.032
28 días	1	0.04	0.59	1.69	1.696
	2	0.09	0.51	1.95	1.601
	3	0.05	0.61	1.62	1.660
	4	0.017	0.418	0.946	1.057

Micro estructura en morteros.

Interface árido-pasta 28 días (figuras 8 y 9)

En el mortero con cemento se observa poca adherencia árido-pasta en comparación con la muestra de mortero con zeolita donde hay una total adherencia y continuidad entre la pasta y el árido.

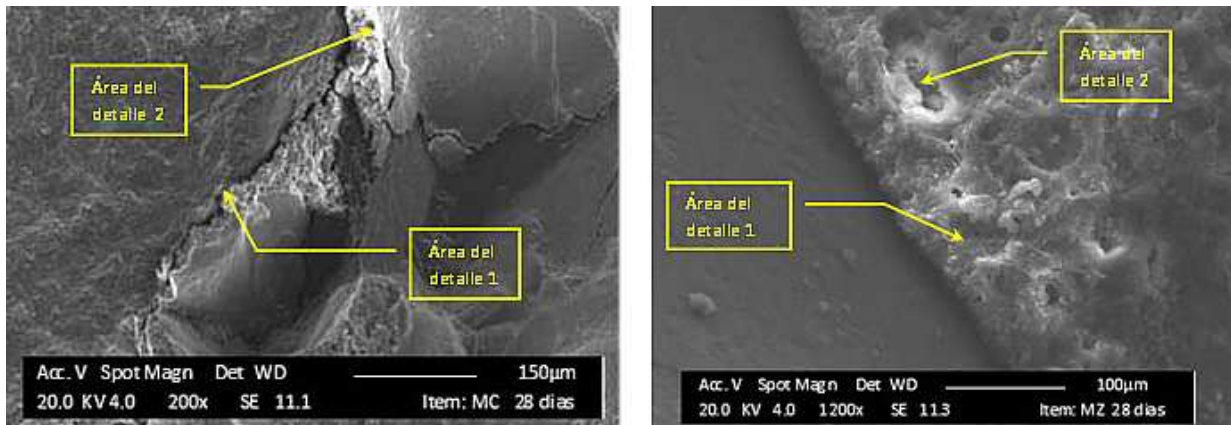


Figura 8. Micrografías de morteros a 28 días. (derecha cemento, izquierda cemento + zeolita)

En el detalle 1 se aprecia que los productos de hidratación en la interface árido pasta tienen diferencias morfológicas, siendo más densa y homogénea en el mortero con zeolita.

Los microanálisis realizados en los productos de hidratación (ver Tabla X) en la zona de interface árido-pasta del mortero de cemento se observa que se han formado silicatos cálcicos en su mayoría semicristalinos con relaciones Ca/Si <1.5 (puntos 1, 2,3) y solo en el punto 4 se observa un producto amorfo.

En el punto 5 hay una formación acicular gruesa que se corresponde con ettringita según el contenido de azufre que reporta el EDX. En el caso del punto 6 se aprecia la formación cristalina muy angulosa de una portlandita, confirmada por el microanálisis.

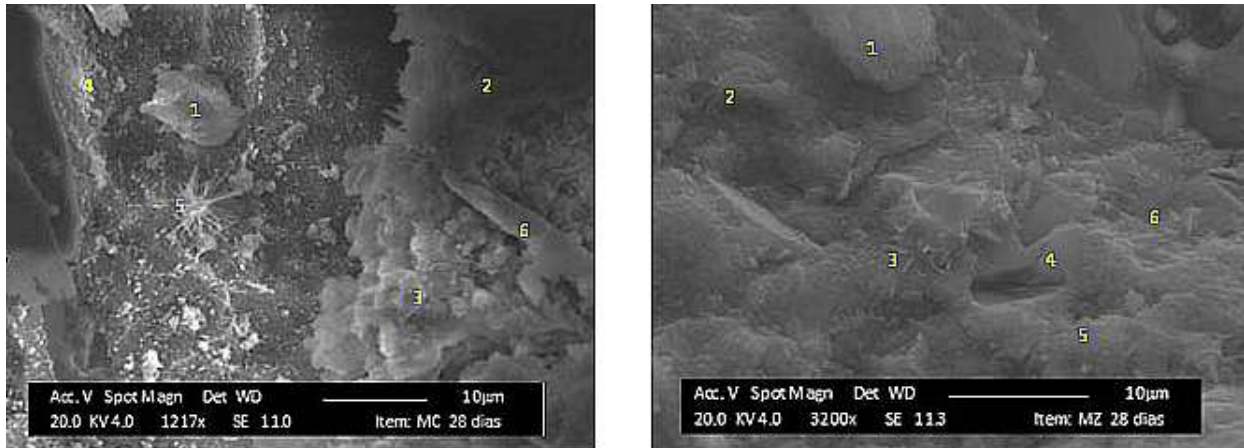


Figura 9. Detalles 1 de los morteros a 28 días. (derecha cemento, izquierda cemento + zeolita)

En el caso del mortero cemento +zeolita, los resultados de los micro análisis nos indican que los productos de hidratación en la interface árido pasta son fundamentalmente aluminosilicatos y aluminatos de calcio, con relación Al/Ca variable, explicado por los aporte de aluminio que realiza la zeolita (puntos 1, 2, 5, 6). Son más densos y con formaciones aciculares en todas direcciones.

En el punto 3 aparece una pequeña formación de ettringita y en el punto 4 se observa portlandita en forma hexagonal en disolución (rodeada por silicatos y aluminatos cálcicos).

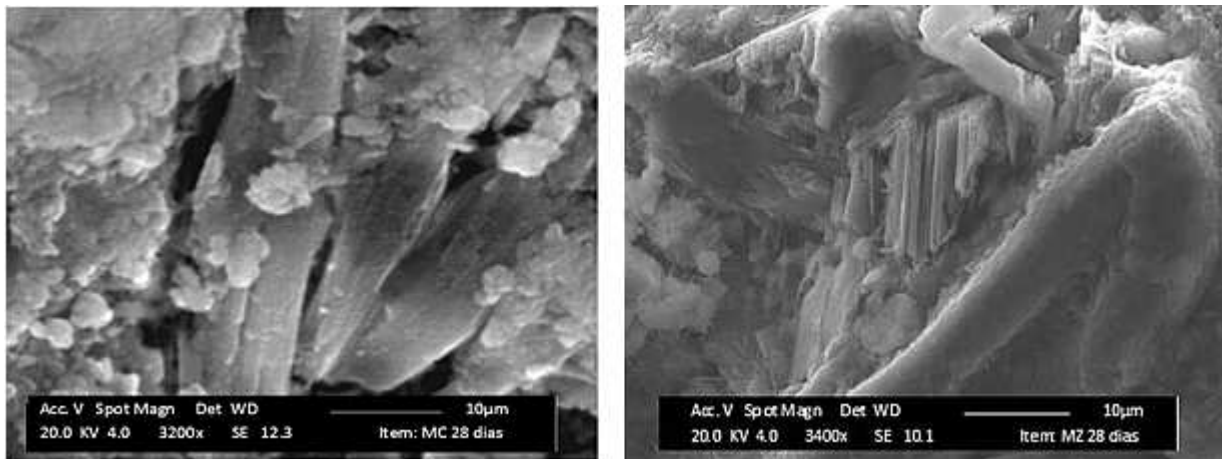


Figura 10. Detalle 2 de los morteros a 28 días (derecha cemento, izquierda cemento + zeolita)

En la figura 10 aparece el detalle 2 de formaciones de portlandita en los morteros a 28 días, donde se aprecia claramente las diferencias morfológicas entre la portlandita formada en la interface árido pasta del mortero cemento y la portlandita formada en la interface del mortero de cemento + zeolita. En esta última los cristales no son angulosos, están incluidos en la masa y se aprecia disolución de los mismos al estar formados a su alrededor silicatos y aluminosilicatos cálcicos.

Tabla X. Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) de los morteros. Relaciones según las masas molares de los productos de reacción

Mortero de cemento				
	S/Ca	Al/Ca	Ca/Si	Si/Ca
1	0.037	0.074	0.084	0.486
2	0.026	0.073	0.052	0.602
3	0.017	0.128	0.046	0.926
4	0.017	0.095	0.065	1.716
5	0.284	0.184	0.140	0.252
6	0.01	0.09	0.00	0.06

Mortero de cemento + zeolita				
	S/Ca	Al/Ca	Ca/Si	Si/Ca
1	0.042	1.566	0.471	2.124
2	0.000	0.435	0.792	1.262
3	0.231	0.282	4.266	0.234
4	0.001	0.002	24.870	0.040
5	0.026	0.172	0.955	1.047
6	0.029	0.174	0.990	1.011

Las resistencias mecánicas y la absorción capilar obtenida en los morteros a las diferentes edades aparecen en las tablas y gráficos siguientes.

Tabla XI. Resultados de las resistencias a compresión de los morteros a diferentes edades

Mortero	Resistencia a compresión MPa		
	3 días	7 días	28 días
Cemento	16,8	22,7	37,9
Cem + Zeo	16,9	25,8	46,5

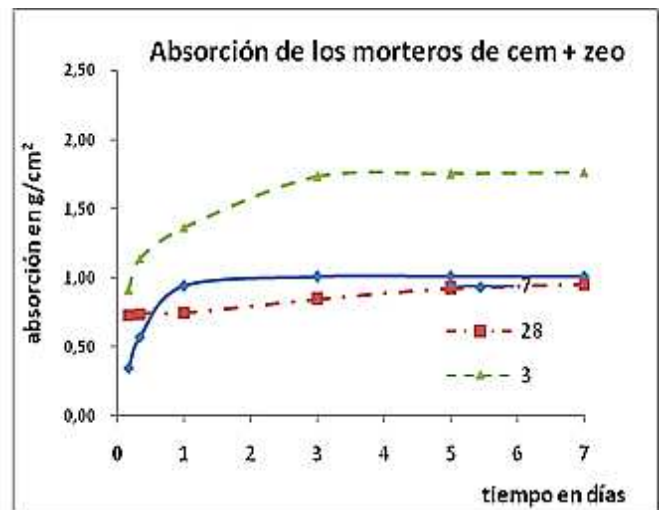
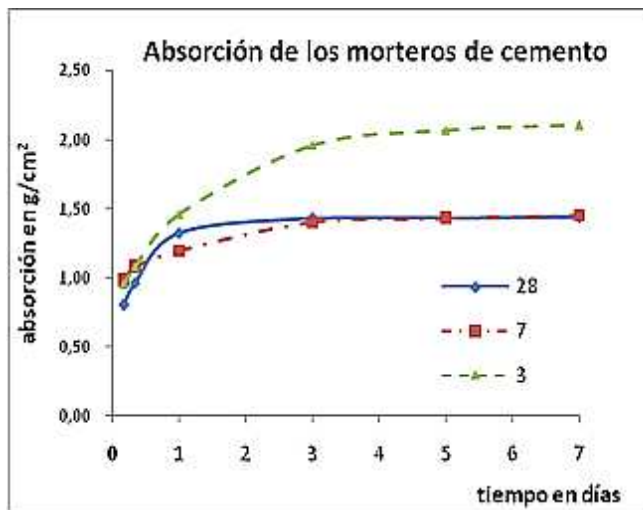


Figura11. Comportamiento de la absorción capilar en el tiempo de los morteros

## DISCUSION

Los resultados de la caracterización del cemento nos indica que estamos en presencia de un cemento P350 que cumple con los parámetros de calidad de la normativa cubana.

La zeolita de acuerdo a su composición química y el difractograma es del tipo clinoptilolita-heulandita con presencia de mordenita. La relación Si/Al es de 5,48 lo indica que es mayoritariamente clinoptilolita que tiene relaciones Si/Al mayores que 4.

El tamaño medio de partícula es de 48  $\mu\text{m}$ , con un retenido en el tamiz 0,044 $\mu\text{m}$  de un 43 %, sin embargo tiene una alta superficie específica total, mucho más alta que la que se reporta para la micro sílice y las cenizas volantes (25  $\text{m}^2/\text{g}$ ) correspondiéndose con tamaños medios de partículas en el orden de las 10  $\mu\text{m}$ . Es de señalar que la superficie específica externa de la zeolita (Blaine) difiere en el orden de los miles, de la superficie total, por lo que se considera que esta discordancia se debe a la estructura cristalina de la zeolita caracterizada por grandes cavidades y canales internos.

Desde el punto de vista de actividad, cumple con lo especificado en la norma ASTM C 618, excepto para la finura que exige un 34% máximo retenido, sin embargo ostenta 43%.

Los resultados físico mecánicos: resistencia a compresión a la edad de tres días, el mortero de cemento presenta una mayor resistencia que el mortero de cemento+ zeolita. Esto se corresponde con lo observado en las micrografía de las pastas donde se aprecia mayor formación de productos de hidratación en el mortero de cemento; sin embargo la absorción capilar es menor en el mortero de cemento + zeolita, lo cual puede ser explicado por el efecto filler que produce una masa mas cohesiva y elimina el proceso de exudación. Este comportamiento ha sido descrito de forma similar por Liborio para las adiciones de micro sílices.

En las micrografías de las pastas a 7 días, se observan estas diferencias de compacidad y de morfología de los productos de hidratación, pero que sin embargo aún no reportan diferencias ventajosas de las resistencias, pero si en la absorciones.

La adición de zeolita igual que para otras adiciones activas como el metacaolin o las cenizas de cáscara de arroz las resistencias mecánicas comienzan a tener diferencias a partir de los 28 días, lo cual ha sido explicado por el mecanismo de la reacción de estas puzolanas, las cuales comienzan el proceso a partir de que hay concentración de portlandita como producto de la hidratación del cemento. Es entre los 3 y los 7 días que la portlandita formada comienza un proceso de disolución por reacción con la puzolana, provocando una formación de nuevos productos semejantes a los de productos de hidratación del cemento (geles de tobermorita) con diferencias estequiometrias con respecto al primero. (Shannang 1995).

Cuando hay presencia de puzolanas los productos de hidratación del cemento entonces, son mas densos por la formación adicional de tobermorita rellena total o parcialmente las pequeñas oquedades, poros y micro poros que se han formado por agua o aire; si los sella ha ocurrido el refinamiento de poros, sin embargo si es parcial elimina la conectividad de los poros explicando la disminución de la absorción capilar, sin llegar a ser cero, pero siendo mucho menor la permeabilidad por este concepto, aspecto a corroborar en otros trabajos. (Liborio 2002).

La interface árido pasta es la zona mas lábil a los esfuerzos, dado que tiene pequeños espesores. Es característico que esta interface tenga formaciones altas de portlandita muy cristalizada y de forma alargada y angulosa, orientadas aproximadamente de forma perpendicular al gel y al árido, y por ser una capa delgada tiene mayor porosidad que la matriz de cemento hidratado. (Liborio 2002, Shannang 1995).

El proceso continuo de formación y disolución de portlandita por la presencia de una adición, produce como efecto que los cristales que se forman no sean angulosos sino hexagonales y en dirección del gel, lo cual desde el punto de vista mecánica elimina posibles tensiones y evita fisuras, lo que macroscópicamente se traduce en una mayor resistencia mecánica. (Larbi 1998).

Este comportamiento se observó claramente en las micrografías tomada en la interface árido pasta de los morteros de 28 días, donde se vio mayor adherencia y compacidad en la que corresponde al mortero de cemento + zeolita. De igual modo se evidencio que las morfologías de las portlanditas formadas se corresponde con lo descrito anteriormente.

Todo lo anterior explica que la resistencia a compresión del mortero de cemento + zeolita tiene un incremento del 80 % entre las edades de 7 a 28 días, mientras que el de cemento, solamente se incrementa en un 65%.

Es de resaltar que la adición de zeolita tiene comportamiento diferente la micro sílice o cenizas de cáscara de arroz, dada la naturaleza y composición química que no han sido descritas. Es el caso de la formación de productos hidratados con mayores contenidos de aluminio, los cuales tienen diferencias estequiometrias, siendo las relaciones Al/Ca disimiles. Esto se atribuye a los aportes de aluminio que hace la zeolita en su proceso de reacción.

Es evidenciado en las micrografías y los microanálisis de energía dispersiva de los morteros a 28 días que las adiciones de zeolita en su reacción puzolánica produce además de silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos a diferencia de la micro sílice o la ceniza de cascara de arroz que forman silicatos cálcicos adicionales solamente por la reacción de su componente fundamental: la sílice amorfa.

## **CONCLUSIONES.**

- 1.- La zeolita no cumple el requisito de granulometría sin embargo tiene alta superficie especifica, semejante a las micro sílices y cenizas volantes comercializables internacionalmente.
- 2.- Los incrementos de prestaciones (resistencia y durabilidad) de la reacción puzolánica de la zeolita se pueden explicar por la formación de silicatos hidratados adicionales con morfología semejante a la descrita para las adiciones activas internacionalmente comercializadas como la micro sílice y las cenizas volante.
- 3.- Se puede afirmar que las adiciones de zeolita mejoran la adherencia y la compacidad de la interface árido pasta y que los productos formados por la reacción puzolánica refinan los poros disminuyendo la absorción capilar.
- 4.- Se corrobora que la actividad puzolánica de la zeolita se debe a la reacción de los óxidos ácidos,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que reacciona y forman silicatos y aluminatos cálcicos variando la composición química del gel.

## **BIBLIOGRAFIA**

- ACI. 2000. 232.1R-00. Use of Raw or processed Natural Pozzolans in Concrete. s.l. ACI Committee 232, 2000.
- Gayoso, R. y Rosell Lam, M.B. Uso racional y sostenible de las zeolitas en la construcción. 2004.
- Gayoso, R y Rosell Lam, M.B. Non-conventional aggregates and mineral admixture in high performance concrete. Recife, Brasil : s.n. 2006
- Gener Rizo, Marta. Aplicación de técnicas fisico químicas en el estudio de los productos de hidratación en pastas de cementos con adiciones de tobas. Investigación-Construcción,. Boletín 5. págs. 57-69. 1984.

Gener, M y Martin, A. Rosa Influencia de la demanda de agua en la durabilidad de morteros y hormigones elaborados con cementos mezclados con puzolanas.. 2001.

Larbi, J. A. Study of morphological change of concrete microstructure with silica fume admixture. Abstract PhD Degree. 1998.

Liborio, J. B. L., da Silva, I. J y de Melo, A.B. SEM Analysis of the paste aggregate interface in concrete containing silica fume. Proceedings Third International Conference . Recife, Brazil : ACI International, 2002.

Martin Acosta, A.R.Howland Albear,J.J.. Estudio de durabilidad de hormigones premezclados con cementos con adición. Reporte de Investigación. CTDMC. 2005.

Martinez Ramirez, S, Blanco Varela, M. T. y Gener Rizo, M. Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban. Applied Clay Science . 2006 .

Mehta, P. Kumar y Monteiro, Paulo J. M. Concrete Microstructure, Properties and Materials. Sao Paulo : PINI, 2001.

Pepper, B. Effectiveness of mineral admixture in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction. ASTM Proceedings. V 59. pág. 59pp.

Poon, C.S, y otros. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. págs. 427-432.

Rabilero, A. Mineralogía de las puzolanas. La Habana, Memorias 1ra Convención de Ciencias de la Tierra (ISBN 959-7117-03-7), 2005.

Rabilero, A. Las Puzolanas. Cinética de las reacciones. Stgo de Cuba : Editorial Oriente., 1988.

Ramachandran, V. S y Beaudoin, James J. Handbook of analytical Techniques in concrete Science and technology. [ed.] Institute for Research in Construction National Research Council. Ottawa : Noyes publications, 2001.

Rosell M. B., Gayoso R. A., Calvo B. La zeolita como adición en hormigones de altas prestaciones. . [aut. libro] CYTED, Red XII-C Rocas y Minerales Industriales. IV Jornada Iberoamericana de Materiales de Construcción. Honduras. 2004.

Shannang M.J, Yeginobali A. Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolans. USA. Vol. 25, No. 3., págs. 647-657. 1995..

Taylor, Harold. Cement chemistry. London : Academic Press, págs. 276-323. 1990.

Urrutia F. Gener M. La Habana : Conferencia Internacional sobre ocurrencias propiedades y usos de las zeolitas naturales, Zeolites 91 . Vols. parte II 198. 1991.

Zhang, M.H. y et, al. "Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste". 1996, Vol. 26., págs. 963-977. 1996.