

CONTRIBUCIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL A LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS DE CEMENTOS, MORTEROS Y HORMIGONES

Jorge L. Costafreda Mustelier⁽¹⁾, Benjamín Calvo Pérez⁽¹⁾ y José Luis Parra y Alfaro⁽¹⁾

⁽¹⁾ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Calle de Ríos Rosas, 21 28003. Madrid, España, E-mail: costafreda@yahoo.es; benjamin.calvo.perez@gmail.com y joseluis.parra@upm.es

RESUMEN

Aunque actualmente son conocidas por su multifuncionalidad, las zeolitas naturales siguen ofreciendo nuevos retos a los investigadores, por su adaptación, prácticamente ilimitada, en campos multidisciplinarios que abarcan la salud, nanotecnología, agroindustria, la química y otros muchos. La composición relativamente sencilla de estos minerales, sumada a su gran estabilidad físico-química y sus propiedades diversas, entre las que descuella su carácter como intercambiador iónico, los convierten en un centro de atención de la moderna tecnología.

El presente trabajo pretende dar testimonio de lo comentado mediante la exposición de resultados de investigación sobre el papel de las zeolitas naturales en el incremento de las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones en diferentes etapas, que van desde períodos muy tempranos (2 días) hasta muy tardíos (365 días). Varias especies de zeolitas fueron estudiadas en el presente trabajo, entre ellas: *mordenita-esmectita*, *mordenita-heulandita*, *clinoptilolita-heulandita*, *cuarzo-estilbita* y *tobas zeolitizadas*. Las tareas planteadas en esta investigación comprenden, por una parte, la caracterización de las zeolitas por varios métodos, y por otra, la determinación de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las probetas en las cuales entraron a formar parte. Los resultados obtenidos permitieron establecer la calidad y la durabilidad de las probetas, y sentar las bases para una consideración profunda de las posibilidades de uso intensivo de estos minerales en la mejora de materiales de construcción.

Palabras clave: zeolitas naturales, cementos, morteros, hormigones, resistencias mecánicas

ABSTRACT

Although the natural zeolites are nowadays known by their versatility, they continue offering new challenges to the researcher, propitiated for their adaptation, practically limitless, in diverse fields as the health, nanotechnology, agroindustry, the chemistry among other many. The relatively simple composition of these minerals, added to their great physical-chemistry stability and other properties, mainly their ion-exchanger character, designate these minerals as an important strategic material in the modern technology.

This paper gives some testimonies about results obtained from investigation on cements, mortar and concretes elaborated with certain portions of natural zeolites, as well as their incidence in the mechanical strength at different times (from 2 to 365 days). In this work

several zeolites species were studied: *mordenite-smectite*, *mordenite-heulandite*, *clinoptilolite-heulandite*, *quartz-stilbite* and *zeolitized tuffs*. The targets of this work comprise the zeolite characterization according several methods, as well as the determination of physical, mechanical and chemical properties of mortar. The obtained results allowed to establish the quality and the durability of the mortar, and to sit down the bases for a deep consideration of the possibilities of intensive use of these minerals in the improvement of construction materials.

Key words: Natural zeolites, cement, mortar, concrete, mechanical strength

INTRODUCCIÓN:

Hay, actualmente, muchos y variados trabajos que ponen de relieve la amplia gama de usos que ofrecen las zeolitas naturales, sin que esto signifique un límite definitivo en sus aplicaciones. Cada año, los investigadores publican novedosos resultados que reflejan la versatilidad de estos minerales. Una de las áreas más importantes de aplicación es la industria de la construcción, con todo el ciclo que esta abarca; es decir, desde la fabricación de cementos, morteros y hormigones hasta la restauración y remediación de edificios y estructuras dañadas.

El carácter puzolánico de las zeolitas naturales ha sido demostrado por numerosas autoridades científicas en las dos últimas décadas. Costafreda, J.L. (2008) describe minuciosamente el comportamiento de las zeolitas como puzolanas activas, y lo compara con las variaciones registradas en las propiedades mecánicas de los morteros elaborados con proporciones sustanciales en este mineral. Establece, como otros tantos investigadores, que el empleo de zeolitas, en mezclas de cementos y morteros, provoca el aumento de resistencias mecánicas a edades cercanas a los 28 días.

El carácter reactivo de las zeolitas naturales en sus mezclas con cemento pórtland aumenta en la medida en que lo hace el grado de finura ($< 63 \mu$) (Costafreda, J.L. *et al.* 2011); es un hecho que el tamaño de las partículas, como regla general, influye en la velocidad de reacción. La acción de la zeolita como puzolana se manifiesta en forma de una disminución sensible del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de la cal libre en la pasta a medida que transcurre el tiempo.

El índice de reactividad puzolánica de las zeolitas depende, además de su pureza y calidad, de su capacidad de intercambio iónico y de la complejidad de su composición, donde los diferentes compuestos exhiben comportamientos muy diferentes al entrar en contacto con una disolución saturada en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, influyendo en la velocidad y en la duración de dicha reacción (Costafreda, J.L. *et al.* 2009).

De acuerdo con los resultados obtenidos en investigaciones recientes, la zeolita juega un papel muy importante en la fabricación de cementos con propiedades ventajosas, traducidas como mayor resistencia química, menor calor de hidratación y mayor inhibición de la reacción *álcalis-sílice*. De esta forma, los cementos que se pueden lograr son del tipo pórtland con adiciones resistentes a los sulfatos y al agua de mar (II/A-P y II/B-P-42,5 R/SR/MR), cementos con adiciones puzolánicas (IV/A y IV-B R/SR/MR) y cementos compuestos (V/A R/SR), lográndose una gran durabilidad de los mismos (Costafreda, J.L. *et al.*, 2007).

Los morteros y hormigones elaborados con zeolitas naturales, muestran un elevado índice de actividad resistente a la edad de 28 días, que llega a superar al valor de resistencia del cemento de referencia empleado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se eligieron los siguientes tipos de zeolitas en su estado natural: *mordenita-esmectita*, *mordenita-clinoptilolita*, *clinoptilolita-heulandita*, *cuarzo-estilbita* y *tobas zeolitizadas*. En su caracterización, se aplicó el método de difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido y fluorescencia de rayos x.

Para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas se efectuó una molienda fina previa ($< 63 \mu$) de las muestras de zeolita, y una minuciosa mezcla con cemento pórtland, arena normalizada y agua desmineralizada. Se determinó la consistencia y la expansividad del mortero fresco, así como la densidad, el peso, la resistencia a compresión y el índice de actividad resistente de las probetas endurecidas en diferentes períodos (2, 7, 28, 90 y 365 días).

Paralelamente, se fabricaron probetas constituidas solamente por cemento pórtland y árido natural, destinadas a referenciar, según las normas, los resultados obtenidos a partir del estudio de los morteros combinados con zeolitas.

En los morteros con adición de zeolitas se efectuó una dosificación que consistió en la sustitución del 25% del cemento pórtland por zeolita.

En este trabajo se emplearon las normas siguientes: UNE-EN 196-1: 2005, UNE-EN 196-3: 2005, UNE 80104: 86, UNE-EN 1097-6:2001 - A1:2006 y UNE 80122: 91: EN 196 – 6: 89.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de las muestras mediante el método de difracción de rayos x permitió determinar la presencia de cinco especies mineralógicas bien definidas: *mordenita-esmectita*, *mordenita-clinoptilolita*, *clinoptilolita-heulandita*, *cuarzo-estilbita* y *tobas zeolitizadas*. Otras fases subordinadas también fueron detectadas, como feldespato, feldespatoideos, micas, calcita, vidrio inalterado y variedades de arcillas con abundancia insignificante (ver figura 1).

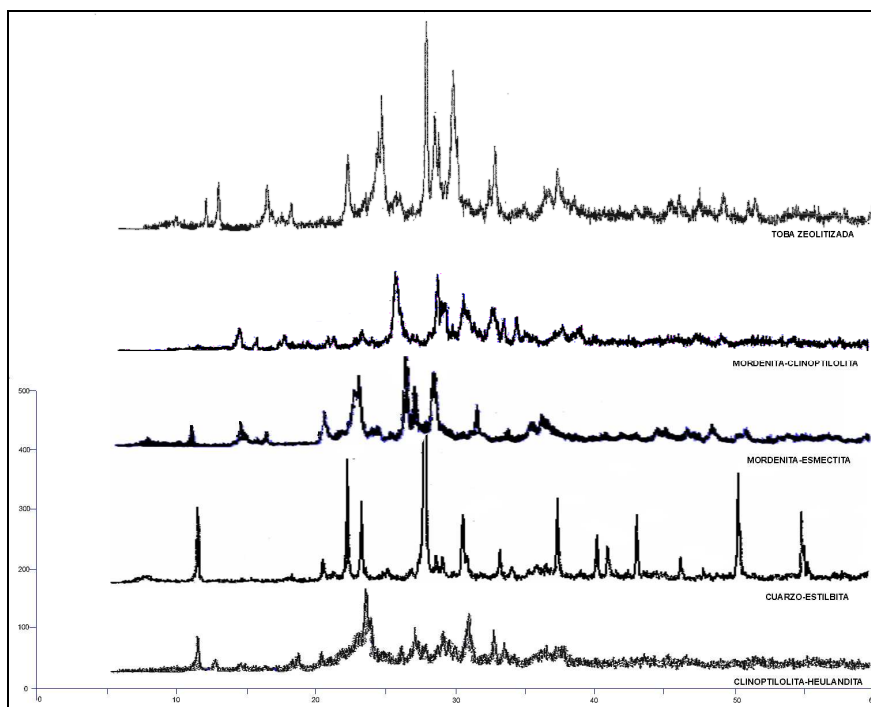


Figura 1: Derivatogramas de las muestras de zeolitas naturales obtenidos por difracción de rayos x.

Las microfotografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido exhiben cristales con morfología variada, definiendo las diferencias entre cada especie mineral. Aparecen cristales bien desarrollados, lamelares, prismáticos, tabulares, hexagonales, idiomórficos a hipidiomórficos de *clinoptilolita-heulandita*, rodeados por generaciones tardías de individuos cristalinos muy finos y de igual composición (ver figura 2 A).

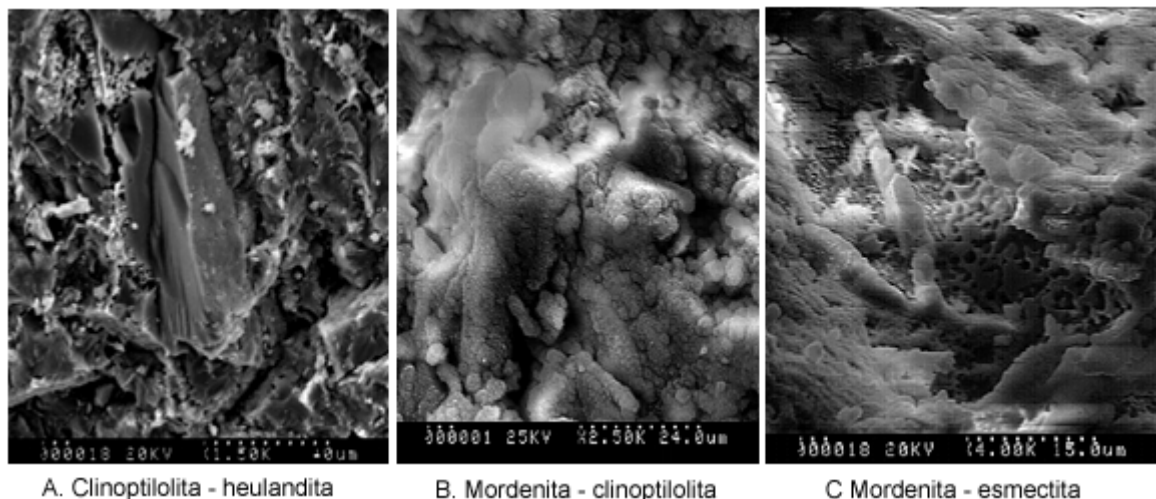


Figura 2: Microfotografías de las muestras de zeolitas naturales obtenidos por microscopía electrónica de barrido. A: *Clinoptilolita-heulandita*, B: *Mordenita-clinoptilolita* y C: *Mordenita-esmectita*.

Es común encontrar agregados microcristalinos muy apretados, de aspecto botroidal, interdigitados, con eflorescencias de *clinoptilolita* xenomórfica muy desarrolladas. La *mordenita* forma complejos racimos cristalinos de reducido diámetro, muchas veces con caras hexagonales idiomórficas, y están circunscritos a los espacios vacíos, poros y anfractuosidades presentes en la muestra (ver figura 2 B).

Los cristales de *mordenita* forman un denso entramado de individuos aciculares, radiales, fibrosos y bacilares en los espacios dejados por minerales otrora lixiviados y disueltos. Forman también masas muy apretadas de innumerables fibrillas que con menor aumento tienen apariencia de masas informes. Los cristales de *esmectita* exhiben una morfología laminar, alargada, con aspecto prismático; también forman masas compactas irregulares e intercrecimientos eflorescentes de aristas redondeadas bien definidas (ver figura 2 C).

Tabla I: Composición química de las muestras empleadas obtenidos mediante fluorescencia de rayos X.

MUESTRA (en estado natural)	S ₂ O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI (%)
Clinoptilolita-heulandita	63,25	12,01	1,22	1,03	1,20	3,23	2,30	16,3
Mordenita-clinoptilolita	63,47	12,59	1,31	3,25	0,336	3,61	0,080	15,0
Mordenita-esmectita	68,79	13,20	1,62	1,95	1,45	2,33	2,89	11,9
Cuarzo-estilbita	68,88	11,71	3,34	5,25	2,75	1,31	0,216	5,84
Toba zeolitizada	64,49	13,19	1,6	0,873	2,09	2,99	3,92	9,75
Cemento referencia	17,45	5,59	3,35	64,04	0,641	1,37	0,091	2,43

En los datos de la tabla I todas las muestras presentan contenidos en alúmina muy parecidos, sin embargo, la sílice varía en un rango más apreciable para las muestras de *mordenita-esmectita* y *cuarzo-estilbita*. Los compuestos restantes poseen valores de abundancia muy diferentes, indicando la naturaleza disímil y poligénica de los minerales estudiados.

Según estos datos, la relación silicio/aluminio de las zeolitas empleadas oscila entre 5 y 5,15, lo cual las hace especialmente reactivas en las mezclas hidráulicas y en disoluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Asimismo, presentan una gran estabilidad de volumen y resistencia térmica, que transfiere a los cementos cualidades excepcionales.

El predominio de los cationes Na^+ y K^+ sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} en las zeolitas estudiadas, a excepción de la muestra compuesta por *mordenita-clinoptilolita*, favorece la remoción del grupo SO_3 de la masa del cemento, impidiendo así la formación de compuestos inestables propensos a reaccionar con el medio ambiente o entre sí, que producen daños severos e irreversibles a morteros y hormigones.

La presencia de zeolita impedirá la difusión del calor de hidratación a través de la pasta y la formación de CO_2 en los procesos de fabricación industrial de cementos.

Como colofón, puede añadirse que la presencia de la paragénesis compleja *mordenita-esmectita* es un factor que favorece la reacción de hidratación en la pasta; en este escenario, la *mordenita* absorbe inicialmente gran cantidad de agua e inicia su reacción con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar tobermorita; inmediatamente después la *esmectita* comienza su hidratación. La presencia mayoritaria del ión Na^+ en los espacios interlaminares hará que la *esmectita* continúe absorbiendo agua, hasta que las láminas se separen definitivamente, pasando al estado coloidal. En esta nueva situación, los coloides dispondrán de mayor libertad de movimiento y transportarán humedad e iones hacia los bordes de las interfases y espacios libres, desencadenando allí nuevas reacciones hidráulicas con la concomitante precipitación de productos de reacción secundarios estables que sellarán los espacios intracristalinos, generando así mayor resistencia mecánica.

Tabla II: Consistencia del mortero fresco.

MUESTRA	CONSISTENCIA (mm)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	DENSIDAD REAL (mg.m^3)	SUPERFICIE ESPECÍFICA (g/cm^2)
Clinoptilolita-heulandita	142,5	33,22	2,20	8865
Mordenita-clinoptilolita	161,95	12,61	2,31	8565
Mordenita-esmectita	154,5	20,36	2,27	8769
Cuarzo-estilbita	176,5	1,69	2,52	8042
Toba zeolitizada	160,0	12,03	2,43	8457
Cemento referencia	260,0	-	-	-

De acuerdo con los datos de la tabla II, la adición de zeolitas a la mezcla del mortero eleva el consumo de agua en todos los casos, evidenciado por los valores del coeficiente de absorción de estas especies minerales, en muchos casos muy elevados (*clinoptilolita-heulandita* y *mordenita-esmectita*).

Los valores de pérdida por calcinación incluidos en la tabla I guardan estrecha relación con el coeficiente de absorción y la superficie específica de las muestras señaladas en la tabla II.

La absorción de las zeolitas tiene su origen en su estructura extremadamente porosa, formada por un entramado complejo de retículos y canales interconectados que las dotan de una gran superficie específica, permitiendo así la absorción libre de moléculas de agua. Como consecuencia de esto, los morteros elaborados en la presente investigación prácticamente carecieron de plasticidad y fluidez manifiestas; en cambio, fueron muy trabajables. Esta situación puede corregirse fácilmente añadiendo agua a voluntad hasta que la mezcla se torne plástica, sin embargo, este procedimiento debe ir precedido de un rigor y precaución extremos, ya que podría inducir a la obtención de morteros poco

resistentes. Un caso manifiestamente contrario ocurrió con los morteros convencionales (referencia), en los cuales la consistencia arrojó valores mucho más elevados, duplicando, prácticamente, el de los morteros complejos (con zeolitas agregadas). Los morteros de referencia manifestaron una baja trabajabilidad y una notable fluidez en todos los casos (ver tabla II).

La consistencia de los morteros compuestos por puzolana natural mantiene una regularidad muy cercana, y se comportan de forma similar con diferencias prácticamente insignificantes. Esto se debe a posibles parentescos químicos entre las zeolitas empleadas en este estudio.

Con la consideración de los resultados de la tabla II puede deducirse una estrecha relación entre los valores del coeficiente de absorción de agua y la consistencia del mortero fresco, revelándose como una relación *inversamente* proporcional. Por el contrario, la relación entre la superficie específica y dicho coeficiente es *directamente* proporcional.

Es evidente que las zeolitas con menor densidad real (*clinoptilolita-heulandita*, *mordenita-esmectita* y *mordenita-clinoptilolita*) poseen los más altos coeficientes de absorción; es decir, ellas presentan una estructura interna muy porosa que induce a una baja densidad, pero al mismo tiempo adquieren capacidad para alojar más moléculas de agua, provocado por su gran superficie activa.

El cálculo de la densidad de las partículas de zeolitas, tras su secado, arrojó valores más bajos, pero con el mismo patrón de comportamiento (Costafreda, J.L., 2011); por ejemplo:

- *Clinoptilolita-heulandita*: 1,27 (mg.m³)
- *Mordenita-esmectita*: 1,57 (mg.m³)
- *Mordenita-clinoptilolita*: 1,79 (mg.m³)
- *Toba zeolitizada*: 1,83 (mg.m³)
- *Cuarzo-estilbita*: 2,45 (mg.m³)

La muestra de *cuarzo-estilbita* exhibe los valores más bajos de absorción de agua, así como los más altos de densidad real y densidad tras el secado; la causa de esto radica en su composición, donde el *cuarzo* predomina sobre la *estilbita* en más de un 60%.

Tabla III: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión para distintos períodos de tiempo.

MUESTRAS DE MORTEROS	Rc (2 días) (Mpa)	Rc (7 días) (Mpa)	Rc (28 días) (Mpa)	Rc (90 días) (Mpa)	Rc (365 días) (Mpa)
Clinoptilolita-heulandita	16,3	27,9	50,4	62,4	70,1
Mordenita-clinoptilolita	15,9	28,5	50,9	66,5	70,9
Mordenita-esmectita	18,4	29,8	47,8	70,1	73,2
Cuarzo-estilbita	12,1	22,9	43,3	55,5	58,9
Toba zeolitizada	15,3	26,8	44,9	61,5	68,0
Cemento referencia	24,3	42,7	50,6	66,1	68,4

Los valores de resistencia mecánica varían dentro de un amplio margen para períodos muy cortos de curado (2 días) en aquellos morteros diseñados con zeolita natural. Destaca la diferencia significativa con los valores arrojados por la muestra de referencia. Un caso muy similar se presenta con los resultados obtenidos a 7 días, donde la gran mayoría de especímenes aportan resistencias muy cercanas, a excepción de la probeta elaborada con *cuarzo-estilbita*, cuyo valor se mantiene muy bajo respecto a las restantes muestras. A pesar de este detalle, se destaca un aumento general de las resistencias (ver tabla III).

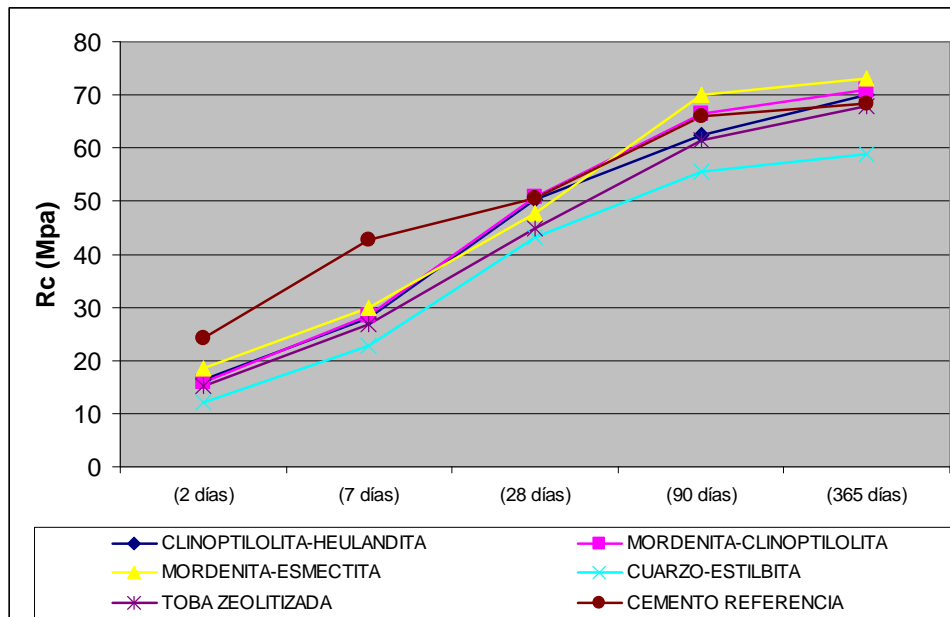


Figura 3: Evolución de las resistencias mecánicas en el tiempo.

Las resistencias normales a los 28 días son evidentemente elevadas, siendo las especies más puras (*clinoptilolita-heulandita*, *mordenita-clinoptilolita* y *mordenita-esmectita*) las que han favorecido este proceso. En esta etapa, dos muestras superan en resistencia mecánica al cemento de referencia (*mordenita-clinoptilolita* y *mordenita-esmectita*) (ver figura 3). Costafreda, J.L. (2008) demostró que ciertos morteros fabricados a base de *zeolita-cemento* y *toba-cemento*, alcanzaban resistencias que superaban la del cemento pórtland normal transcurridos los 28 y 90 días de curado.

A edades superiores (90 y 365 días), el proceso de endurecimiento e incremento de las resistencias mecánicas continúa verificándose, registrándose valores de hasta 73,2 Mpa. La muestra formada por *mordenita-esmectita*, sigue siendo un caso excepcional en esta investigación; su gran resistencia, en relación a las restantes, puede explicarse por el doble efecto que produce en la pasta la presencia de esta paragénesis mineral, donde la elevada superficie específica de ambas especies, tanto interna como externa, la carga eléctrica reforzada por las constantes sustituciones isomórficas y la presencia de iones alcalinos y alcalino-térreos, fácilmente intercambiables, refuerzan sus cualidades como puzolanas altamente reactivas, y aportan, como consecuencia, los mayores índices de actividad resistente (ver tabla IV). Al igual que las zeolitas, la presencia de la *esmectita* contribuye a la captación de cal libre presente en la pasta, evitando el fenómeno de expansividad ulterior.

Otros valores notables fueron alcanzados por las probetas elaboradas con *clinoptilolita-heulandita* y *mordenita-clinoptilolita* (70,1 y 70,9 Mpa, respectivamente), superándose en ambos casos los valores del mortero de referencia (ver tabla III y figura 3).

Algunos autores (Rabilero, A., 1988; Rosell, M. *et al.* 2002) subrayan que las resistencias mecánicas de morteros y hormigones tienen un desarrollo finito tras alcanzar un valor máximo, y, a partir de un período de tiempo dado, los valores de resistencia sufren ciertas remisiones, traducido en inestabilidad química y física. Sin embargo, con la adición de ciertas variedades de zeolitas en cementos, morteros y hormigones aumenta el valor de la constante (K_R) en relación con (G_R); ambas constantes están estrechamente vinculadas con los procesos de hidratación del cemento en presencia de agua.

Tabla IV: Resultados del cálculo del Índice de Actividad Resistente para las distintas muestras de morteros.

MUESTRAS DE MORTEROS	Rc 28 días (Mpa)	IAR (%)	Rc 90 días (Mpa)	IAR (%)	Rc 365 días (Mpa)	IAR (%)
Clinoptilolita-heulandita	50,4	99,6	62,4	94,4	70,1	102,5
Mordenita-clinoptilolita	50,9	100,6	66,5	100,6	70,9	103,7
Mordenita-esmectita	47,8	94,5	70,1	106,0	73,2	107,0
Cuarzo-estilbita	43,3	85,6	55,5	84,0	58,9	86,1
Toba zeolitizada	44,9	88,7	61,5	93,0	68,0	99,4
Cemento referencia	50,6	-	66,1	-	68,4	-

Los valores del Índice de Actividad Resistente (*I.A.R.*) se obtuvieron con los ensayos mecánicos de las probetas involucradas en este trabajo, mediante los cuales fueron comparados todos los valores de resistencias con el 75% del valor de resistencia de la probeta de referencia. Los cálculos reflejan una situación muy interesante, en virtud de que los resultados obtenidos superan en todos los casos los límites estipulados en las normas (ver tabla IV). El incremento de los valores del *I.A.R.* es *directamente* proporcional a la magnitud tiempo, cuando se emplean zeolitas naturales con gran reactividad puzolánica (Costafreda, J.L., 2008).

Tabla V: Evolución del peso de las probetas de morteros en el tiempo.

MUESTRAS DE MORTEROS	Peso promedio inicial (g)	Peso promedio (7 días) (g)	Peso promedio (90 días) (g)	Peso promedio (365 días) (g)
Clinoptilolita-heulandita	567,19	572,37	576,33	572,5
Mordenita-clinoptilolita	573,32	579,27	582,23	580,1
Mordenita-esmectita	579,86	581,23	585,83	587,4
Cuarzo-estilbita	580,1	582,6	588,9	594,3
Toba zeolitizada	577,92	580,13	582,35	583,4
Cemento referencia	594,19	596,6	597,92	600,7

La evolución del peso de las probetas durante el período de tiempo en que se produce su curado fue otro parámetro considerado en la presente investigación (ver tabla V). Cuando se compara el peso inicial de todas las probetas con el calculado a los 7 días se destacan variaciones importantes; por ejemplo, los morteros preparados con *clinoptilolita-heulandita*, *mordenita-clinoptilolita* y *toba zeolitizada* incrementan su peso drásticamente, lo cual está relacionado con la capacidad de absorción de agua y la superficie específica de estos minerales (ver tabla II). La mezcla diseñada con *mordenita-esmectita* constituye un caso excepcional, en el cual la composición compleja de esta paragénesis provoca que la porción de la muestra que es *mordenita* absorba el agua más rápido que la fase *esmectita*. Por su parte, la muestra que contiene *cuarzo-estilbita* incrementa tímidamente su peso a causa del pobre contenido en *estilbita* (< 30%) y su bajo coeficiente de absorción.

En el mortero de referencia, la formación de nuevas fases silicatadas e hidratadas incrementa su peso discretamente, propiciado por el papel del yeso como regulador de fraguado. La pérdida de poros y la fina granulometría incrementa su densidad. La presencia de yeso influye en el incremento del peso haciendo que éste sea paulatino (ver tabla V y figura 4).

Es de destacar lo que ocurre con ciertas probetas en etapas más tardías (90 y 365 días) (ver tabla V y figura 4). Se cita como ejemplos las probetas elaboradas con *clinoptilolita-heulandita* y *mordenita-clinoptilolita*, en las cuales se verifica una “pérdida de peso” significativa. Las probetas fabricadas con *mordenita-esmectita* exhiben un rápido incremento

de su peso en la etapa comprendida entre los 7 y los 90 días; se deduce que en este intervalo la fase esmectita ha comenzado a completar su hidratación. Esta tendencia experimenta una atenuación hacia los 365 días, en que el incremento del peso es muy discreto.

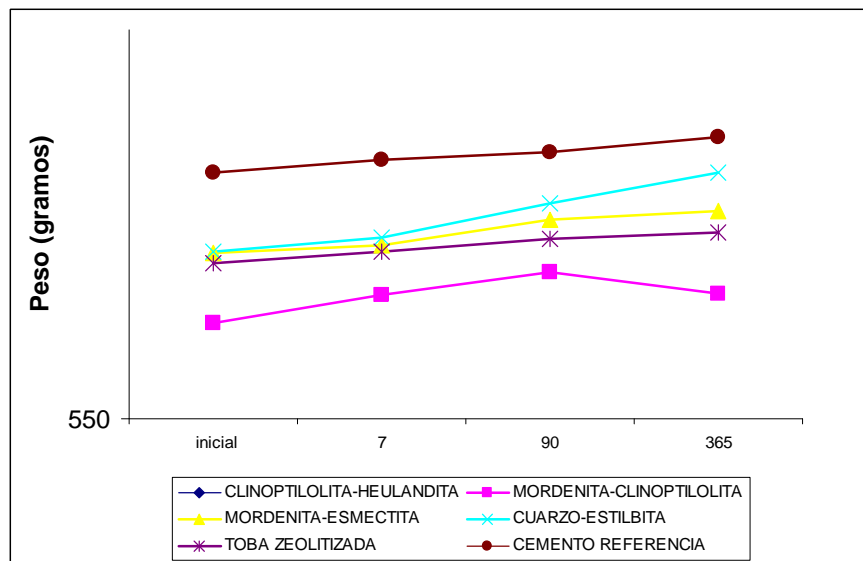


Figura 4: Variogramas que representan la evolución del peso de probetas de morteros en el tiempo.

Se deduce que la pérdida de peso está relacionada con la transferencia de moléculas de agua alojadas en los poros intracristalinos de las zeolitas a la pasta, que demanda más humedad para completar las reacciones hidráulicas de los silicatos.

CONCLUSIONES

Es evidente que con el empleo de las variedades de minerales de zeolitas tratados en el presente estudio, se pueden fabricar cementos, morteros y hormigones dotados de altas resistencias mecánicas. Estas cualidades también se reflejan en su calidad reológica, gracias a la cual se pueden preservar los morteros y hormigones del ataque de los sulfatos que se encuentran en suspensión en ciertas aguas contaminadas en contacto con las obras.

El empleo de zeolitas en los diseños de mezclas, tanto de morteros como de hormigones, disminuye sensiblemente la permeabilidad de las estructuras, cerrándose así el acceso de los sulfatos desde el exterior. Aun así, en caso de verificarse una vía de acceso a la estructura, provocada por microfisuración (producida por seísmos, vibraciones por explosiones, etc.), la acción de estas puzolanas captará y neutralizará las sales de sulfatos foráneas; además, no podrán formarse productos de reacción secundaria, como la etringita y el yeso autógeno, ya que no existen los productos originales de aluminato tricálcico, el cual no pudo reaccionar con la portlandita captada previamente por las zeolitas en la mezcla. De esta forma se evitarán los fenómenos de expansión y fisuración por ataques de sulfatos.

La presencia de zeolitas en la composición de las probetas de morteros garantiza la humedad duradera en el medio de reacción, por su propiedad de *retención-liberación* de líquidos, además de sólidos y gases. En virtud de esto, contribuirá no sólo a la perfecta hidratación de los silicatos de reacción más lenta, como los bicálcicos, sino también a la correcta saturación de las partículas del cemento, siempre que la molienda previa haya cumplido rigurosamente con las especificaciones de las normas. El control de los niveles de humedad ejercido por las zeolitas impedirá los excesos de evaporación en la pasta, y con

ello se evitará la formación de espacios vacíos, poros y anfractuosidades en los sitios previamente ocupados por el agua, y que constituyen puntos de debilidad y/o concurrencia de sales destructivas con desarrollo de etringita acicular.

El uso de zeolitas en morteros y hormigones puede mitigar, incluso evitar, ciertos fenómenos muy importantes por su carácter destructivo, como la reacción *álcalis-sílice* y *álcalis-carbonato*, ambos responsables de la fisuración y expansión en estructuras hormigonadas. Del mismo modo, la presencia de estos minerales en la pasta contribuye a frenar la acción perjudicial de los cloruros sobre las armaduras metálicas de los hormigones armados.

Tienen utilidad también en la neutralización de la reacción del CO₂ atmosférico con el Ca(OH)₂ de los morteros y hormigones consolidados, ya que en los primeros estadios de hidratación del cemento las zeolitas neutralizan prácticamente toda la cal hidratada, convirtiéndola en tobermorita estable; de este modo, en las etapas de madurez de los morteros y hormigones no habrá cantidades disponibles de Ca(OH)₂ ni cal libre que entren en reacción con los gases atmosféricos.

Se debe tener en cuenta que el empleo de zeolitas en las mezclas de morteros y hormigones obliga a aumentar la relación A/C, debido a su gran propensión a hidratarse. La experiencia señala que los diseños de mezclas con ratios A/C comprendidos entre los 0,25 y 0,60 producen morteros poco trabajables, de escasa consistencia, de moldeo dificultoso durante la compactación; en estos casos, se procede a aumentar la cantidad de agua, con el criterio de obtener una masa más plástica, pero evitando infringir ciertos límites que ponen en riesgo la calidad del mortero y del hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

Costafreda, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. 515 p.

Costafreda, J.L. y Calvo, B. (2007). Calidad de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata como agregados activos en cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos y al agua de mar. *V Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*. Panamá. 13 p.

Costafreda, J.L., Díaz, J.J. y Calvo, B. (2011). Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España. *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2011*. La Habana, Cuba. Págs. 9.

Rabilero, A. (1988). Las puzolanas. Cinética de reacciones. *Editorial Oriente*. Santiago de Cuba. 114 p.

Rosell, M. y Gayoso, R. (2001). Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. *I Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*. Red CYTED XIII-C. 10 p.

UNE-EN 196-1:2005. Ensayos mecánicos.

UNE-EN 196-3: 2005. Ensayos físicos.

UNE 80122: 91: EN 196 – 6: 89. Determinación de la finura.

UNE-EN 1097-6:2001 y A1:2006. Densidad de partículas y absorción de agua.

UNE 80104: 86: Determinación de la densidad real mediante el picnómetro de aire.