

# APLICABILIDAD DE LAS ZEOLITAS COMO REGULADOR DE FRAGUADO

María Aranzazu Diez Esteban<sup>(1)</sup>, Jorge Luis Costafreda Mustelier<sup>(2)</sup>, José Luis Parra y Alfaro<sup>(2)</sup> y Domingo Alfonso Martín Sánchez<sup>(2)</sup>

(1)Atlas Copco S.A.E. Avenida José Garate, 3. Pol. Ind. De Coslada, 28823 Coslada, Madrid. ([mariaaranzazu\\_diezesteban@hotmail.com](mailto:mariaaranzazu_diezesteban@hotmail.com)); (2)Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid. ([costafreda@yahoo.es](mailto:costafreda@yahoo.es)), ([joseluis.parra@upm.es](mailto:joseluis.parra@upm.es)) y ([domingoalfonso.martin@upm.es](mailto:domingoalfonso.martin@upm.es))

## RESUMEN

El presente trabajo propone sustituir la proporción que corresponde al yeso en un cemento pórtland por zeolita natural, a fin de regular el fraguado de la pasta en condiciones más o menos similares a las ordinarias, y obtener igualmente resistencias mecánicas aceptables. Los criterios seguidos en esta investigación tienen su base en la propiedad de las zeolitas como intercambiadores iónicos, mediante la cual pueden saturarse de agua rápidamente, controlando la humedad de la pasta, y neutralizando así la reacción del  $C_3A$  con el  $Ca(OH)_2$ ; de este modo, “*ralentizan*” el fraguado durante un período de tiempo lo suficientemente adecuado como para facilitar la hidratación óptima de los silicatos, principalmente los bicálcicos, con la formación de variedades secundarias más estables, como la tobermorita. Las resistencias mecánicas obtenidas en esta investigación alcanzaron los 59,3 Mpa a los 28 días. Asimismo, los ensayos para la determinación de los tiempos de inicio y final de fraguado arrojaron resultados de 95 y 135 minutos, respectivamente, mientras que la expansión resultó igual a cero en todos los casos.

Palabras claves: zeolitas, yeso, fraguado, cemento, resistencia

## ABSTRACT

This work proposes to substitute the proportion of gypsum on cement by natural zeolite, in order to regulate the forged of the mortar under conditions more or less similar to the ordinary ones, and to obtain high mechanical strength. The approaches used in this investigation have been focused on the zeolites property as *ion-exchanger*, by means of which it can be quickly saturated itself with water, controlling the humidity inside mortar, and neutralizing the reaction of both, the  $C_3A$  and  $Ca(OH)_2$ ; this way, zeolites diminishes the forged speed during an appropriate time in which it allows the complete hydrate of the silicates, mainly the belite, with the formation of secondary more stable varieties, as tobermorite. The mechanical strength obtained in this investigation reached 59,3 Mpa at 28 days. Also, the tests for the determination of the times of *starting-final* forged have reported results of 95 and 135 minutes, while the volume stability was similar to zero in all the cases.

Key words: zeolites, gypsum, forged, cement, strength

## INTRODUCCIÓN

En la práctica cotidiana de la fabricación del cemento p rtland se emplea el yeso como regulador de fraguado, no sólo por su composición química y propiedades, sino también por su abundancia y condiciones de yacencia que lo convierten en una materia prima de fácil extracción y con gran demanda. Existen otros compuestos que aportan al clínker las mismas cualidades, pero su extracción, beneficio y adaptabilidad convertirán el proceso en un ciclo muy complejo al tiempo que costoso; entre estos se citan algunas sales, como el cloruro, bromuro, yoduro y ciertos fosfatos que forman compuestos con el calcio. El yeso satura al  $C_3A$  en el clínker e impide que se hidrate instantáneamente, formándose un producto de reacción primaria conocido como etringita o sal de candlot, que aporta cierta resistencia incipiente a la pasta; sin embargo, esta nueva especie mineral es propensa a reaccionar con los sulfatos del medioambiente, produciendo expansión.

Las zeolitas constituyen el grupo mineral más variado y extenso de los que forman la corteza terrestre; se caracterizan por poseer una estructura abierta y por su capacidad para incorporar y ceder agua y cationes en su estructura, sin cambios importantes en la misma. Forman yacimientos poco o nada complejos, de fácil explotación, y su extracción no conlleva a impactos fuertes en el manto freático. Su capacidad de intercambio iónico, combinada con su alta reactividad puzolánica, ejerce una influencia favorable en sus mezclas con cemento p rtland, cuyas características y evoluciones han sido estudiadas a diferentes edades (Costafreda, J.L., 2008).

El presente trabajo tiene la finalidad de efectuar un estudio preliminar del comportamiento de la zeolita natural como regulador de fraguado en un clínker portland, manejando para ello diversas premisas y metodologías para asegurar el éxito de esta investigación.

Durante los procesos de calentamiento en los hornos, la desintegración del grupo sulfato, a partir del yeso, libera ciertas cantidades de azufre que reacciona rápidamente con el vapor de agua procedente de las reacciones exotérmicas; en estas condiciones se produce dióxido de azufre como producto inestable de reacción, convirtiéndose después en ácido sulfúrico, cuya combinación con el hidróxido de calcio forma el  $CaSO_4$ , altamente perjudicial para cementos, morteros y hormigones por su tendencia a la expansividad.

Otras de las razones que justificarían la sustitución del yeso por zeolita es que durante la molienda del clínker se produce un gran aumento de la temperatura, que puede ser la causa de la remoción de moléculas de agua de la estructura del yeso. Sin embargo, en las zeolitas el agua de constitución no se pierde sino a grandes temperaturas (198 C - 450 C) (Costafreda, J.L., 2008; Costafreda, J.L., 2009).

En resumen, la esencia de este trabajo radica en utilizar las propiedades de las zeolitas para la regulación del fraguado. La acción del yeso en el clínker se basa en que debido a su gran solubilidad pasa a la disolución, sobresatur ndola, y creando condiciones desfavorables para la hidratación de los aluminatos y favoreciendo, en

cambio, la formación de etringita a un ritmo controlado. Este mismo principio se ha tenido en cuenta en esta investigación para usar zeolita natural, la cual, a pesar de no disolverse como el yeso, es capaz de reaccionar con el hidróxido de calcio, impidiendo la formación de portlandita, y de inhibir la hidratación del  $C_3A$ , la formación de sales de candlot y de aluminatos tetracálcicos. En su lugar, permite que los silicatos con reacción lenta, como la belita, se hidraten completamente, y den lugar a una mezcla compuesta mayoritariamente por minerales silicatados estables.

Podría plantearse, entonces, que si el yeso regula la velocidad del fraguado mediante un proceso de *disolución-saturación*, la zeolita lo hace a través del intercambio iónico y de sus propiedades puzolánicas. Esa es la razón fundamental que justifica la presente investigación.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para la realización de las distintas fases del presente trabajo, se emplearon los siguientes materiales y metodologías:

### ***Clínker:***

La muestra de clínker estudiada procede de la Fábrica Integral de Cemento de San Vicente del Raspeig, Alicante. Previamente, el clínker (K) fue analizado por difracción de rayos X y se obtuvo un difractograma típico con picos muy débiles de anhídrita (trazas) y yeso (indicios). La cantidad de yeso detectada fue inferior al 1%.

La composición del clínker se determinó de forma cuantitativa, según las normas UNE 80216:1991 EX y UNE 80216, de Junio del 2010. El sistema descrito en estas normas es un método de disolución activa que sirve de referencia cuando no se dispone de los componentes del cemento pòrtland por separado, como es la situación de la presente investigación.

Para el cálculo de los componentes del clínker se determinó el contenido en trióxido de azufre (norma UNE-EN 196-2:2006), dióxido de carbono (Norma UNE-EN 196-2:2006) y residuo insoluble para dos tipos de muestra: la primera, con 0,500 g +/- 0,020 g de (K) por ataque con disolución de EDTA (Norma Experimental UNE 80216:1991 EX o Norma UNE 80216:2010); la segunda, con 1,00 g +/- 0,02 g de (K) por ataque con ácido clorhídrico diluido (Norma Experimental UNE 80216:1991 EX o Norma UNE 80216:2010).

Los datos mencionados en el párrafo anterior, así como el empleo de las fórmulas indicadas en las normas UNE 80216:1991 EX y UNE 80216:2010, permitieron el cálculo de los componentes del clínker (ver tablas II y III).

### ***Zeolita Natural:***

La muestra de zeolita empleada fue tomada en yacimientos de las formaciones volcánicas calcoalcalinas del sureste de España; sus principales características se expresan en la figura 1 y en la tabla IV, respectivamente.

La muestra fue previamente triturada y tamizada en el tamiz N° 26/13 luz 0,063 mm, de diámetro 200 mm y material AISI 304, obteniéndose una población granulométrica por debajo de las 63 micras (Norma UNE EN 933-1:1998).

### **Arena normalizada:**

La arena normalizada (AN) utilizada en el presente estudio procede de Instituto Eduardo Torroja (CEN-UNE-EN 196-1). Es un árido fino natural, silíceo, de granos redondeados, con un contenido en sílice cercano al 98% (ver figura 2 y tabla V).

### **Adición de la zeolita natural al clínker. Preparación, dosificación y ensayos:**

Para dar cumplimiento al objetivo del presente trabajo, se elaboró un cemento *tipo I* con zeolita ( $K+Z$ ) en sustitución del yeso como regulador de fraguado, sin componentes minoritarios; paralelamente, se elaboró otro cemento *tipo I*, que a los efectos de esta investigación fue denominado *cemento de referencia* o ( $K+Y$ ), con un 95% de clínker y 5% de yeso en masa, con el propósito de referenciar adecuadamente los resultados obtenidos en los ensayos con zeolita (ver tabla I).

En la práctica se emplea un 4% de yeso para moler junto al clínker, pues el criterio impone que esta cantidad, en relación al peso total de la masa del clínker pórtland, garantiza las altas resistencias. Sin embargo, esta cantidad es muy difícil de determinar, pues es directamente proporcional a la abundancia de aluminatos tricálcicos presentes, haciéndose imperativo un cálculo cuidadoso y consecuente. Según la experiencia, se añade una porción discretamente superior al 4%, a fin de cubrir dos fases fundamentales: neutralizar todo el  $C_3A$  y mantener en lo posible las resistencias deseadas. En el presente estudio se ha adoptado el 5% como valor representativo.

Tabla I: Relación de componentes de las mezclas anhidras de clínker con zeolita ( $K+Z$ ) y clínker con yeso ( $K+Y$ ).

Denominación de la mezcla	Componentes	Dosificación (%)	Masa (g)
Mezcla ( $K+Z$ ) <sup>1</sup>	Clínker	95	19000
	Zeolita	5	1000
	Yeso	0	0
Mezcla ( $K+Y$ ) <sup>2</sup>	Clínker	95	4750
	Zeolita	0	0
	Yeso	5	250

1 Clínker + zeolita; 2 Clínker + yeso (cemento de referencia).

No se cuenta con referencias bibliográficas sobre investigaciones realizadas en este campo con anterioridad; por esta razón, previo a la elaboración de los 20 Kg de muestra ( $K+Y$ ) se hizo una amasada de mortero con las cantidades de agua, árido fino y cemento pórtland que indica la norma UNE-EN 196-1:2005 (*Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*), a fin de determinar la consistencia de la pasta.

Una vez establecida la proporción de las mezclas, se efectuaron tres amasadas por edad (2, 7 y 28 días) con ( $K+Z$ ) y tan sólo una amasada con ( $K+Y$ ) para las mismas

edades, según las prescripciones del apartado seis (6) de la norma europea EN 196-1:2005.

En los párrafos siguientes se mencionan los ensayos realizados a las mezclas (K+Z) y (K+Y).

*Ensayos químicos del clínker anhidro y combinado (mezclas (K+Z) y (K+Y)):*

- Determinación de la pérdida por calcinación (P.P.C.) (UNE-EN 196-2:2006).
- Determinación del contenido en sulfato (UNE-EN 196-2:2006).
- Determinación del residuo insoluble en ácido clorhídrico y en carbonato de sodio (UNE-EN 196-2:2006).
- Determinación de cloruros (UNE-EN 196-2:2006).
- Determinación de dióxido de carbono (UNE-EN 196-2:2006).
- Determinación cuantitativa de los componentes (UNE 80216:1991 EX y UNE 80216:2010).

*Ensayos físicos de las mezclas:*

- Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen (Norma UNE-EN 196-3:2005).

*Ensayos físicos y mecánicos de los morteros elaborados con (K+Z) y (K+Y):*

- Determinación de resistencias mecánicas a 2, 7 y 28 días (norma UNE-EN 196-1:2005).

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En las tablas II y III se ilustran los resultados de los componentes del clínker, de acuerdo con los criterios establecidos por las normas UNE 80216:1991 EX y UNE 80216:2010. Según los resultados obtenidos, el clínker elegido es puro y prácticamente libre de adiciones, con proporciones insignificantes de yeso.

Tabla II: Componentes del clínker según la Norma Experimental UNE 80216:1991 EX (resultados expresados en % en masa).

UNE 80216:1991 EX		
	CON REGULADOR %	SIN REGULADOR %
C	95,7	97,9
L	0,8	0,8
P+S	1,0	1,0
R	2,2	0,0
D	0,3	0,3
TOTAL	100	100

C= Clínker; L= Escoria; P+S= Puzolana, cenizas volantes y filler silíceo; R= Regulador de fraguado y D= Filler calizo.

Tabla III: Componentes del clinker según la norma UNE 80216:2010.

UNE 80216:2010		
	CON REGULADOR %	SIN REGULADOR %
C	95,8	97,7
S	0,0	0,0
P+V	2,3	2,3
R	1,9	0,0
L	0,0	0,0
TOTAL	100	100

C= Clínker; S= Escoria; P+V= Puzolana, cenizas volantes y filler silíceo; R= Regulador de fraguado y L= Filler calizo.

El estudio de la zeolita natural empleada, tanto por difracción de rayos X (ver figura 1) como por fluorescencia de rayos X (ver tabla IV) estableció las siguientes propiedades:

- Contenido en mordenita= 97%-100%
- Si/Al= 5
- $K_2O/Na_2O= 0,48-1,66\%$
- $Fe\ total/MgO= 0,43-1,17\%$
- $SiO_2\ total= 68,3\%$
- $Contenido\ en\ Al_2O_3= 11,95\%$

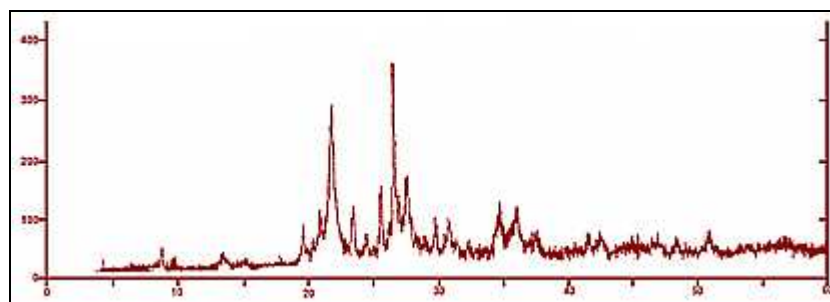


Figura Nº 1: difractograma correspondiente a la muestra de zeolita empleada en la presente investigación (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Tabla IV: Composición química de la zeolita, obtenida por fluorescencia de rayos x (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Compuestos en % de masa (zeolita natural)										PPC
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	(%)
68,42	9,64	1,2	3,63	2,14	1,09	1,27	0,462	0,113	0,062	12,0

La zeolita es, predominantemente, silíceo y sódico-silíceo, siendo los iones Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> los más abundantes, con predominio del primero. La relación silicio/aluminio señala su gran estabilidad química y estructural (Calvo, B. *et al.* 2005).

La zeolita estudiada no contiene sulfato en su composición (ver tabla IV), como el yeso, con lo cual su uso evitaría la incorporación de esta sal en el clinker y en la pasta, con las correspondientes patologías a mediano y largo plazo. En la extracción del yeso puede incorporarse cierta cantidad de anhidrita de facies originadas por transformaciones geológicas en los yacimientos evaporíticos, que posteriormente, al

entrar en el proceso de fabricación del cemento, puede producir falso fraguado, su presencia puede producir falso fraguado e incorporación anómala de sulfato.

La típica propiedad de las zeolitas como intercambiadores iónicos permitiría la sustitución del sodio reticular por el calcio captado de la pasta, como lo hace el yeso, evitando la acción nociva de los álcalis, cuya presencia impide el desarrollo de las resistencias mecánicas, inhibe la hidratación de los silicatos y aumenta la velocidad de reacción de los aluminatos con formación de etringita.

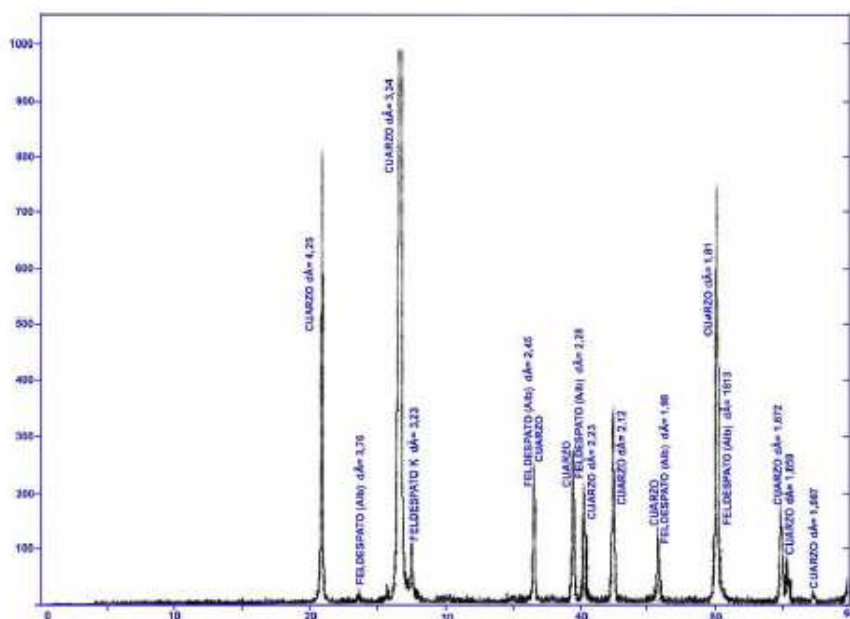


Figura N° 2 Difractograma obtenido del análisis de las fases mineralógicas que componen la arena normalizada empleada en el presente trabajo (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

La arena normalizada está compuesta por dos fases mineralógicas, cuarzo (95%) y feldespato (5%), que le confieren una alta pureza y una elevada estabilidad física y química (ver figura 2).

Tabla V: Composición química de la arena normalizada anhidra, determinada por fluorescencia de rayos x (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Compuestos en % de masa (Árido natural anhidro)										PPC (%)	(%) Total
SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
94,25	0,93	0,88	2,24	0,059	0,058	0,06	0,86	0,141	0,038	0,48	100

Los resultados de la composición química (FRX) (ver tabla V) confirman la presencia de cuarzo + feldespato en la composición del árido fino y sus respectivos niveles de abundancia. Los insignificantes contenidos en compuestos alcalinos, alcalino-térreos, ferrosos y sulfatos en su composición, son indicadores indiscutibles de la pureza de esta arena.

Tabla VI: Resultados del análisis químico de las mezclas (K+Y) y (K+Z).

ANÁLISIS QUÍMICO	K+Y (en % en masa)	K + Z (en % en masa)
P.P.C. (975 °C)	1,19	0,75
R.I. (en HCl y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0,13	3,07
SULFATOS (SO <sub>3</sub> )	3,34	1,23
CLORUROS	0,02	0,04

Todos los ensayos químicos realizados con las mezclas (K+Y) y (K+Z) arrojaron resultados que cumplen con las exigencias de la norma UNE EN 197-1:2000, para un cemento *tipo I* (ver tabla VI y figura 3). Sin embargo, los altos contenidos en sulfatos en relación con la P.P.C. y calculados para la mezcla (K+Y), sugieren un estudio de control para determinar la cantidad de moléculas de agua alojadas en el yeso empleado.

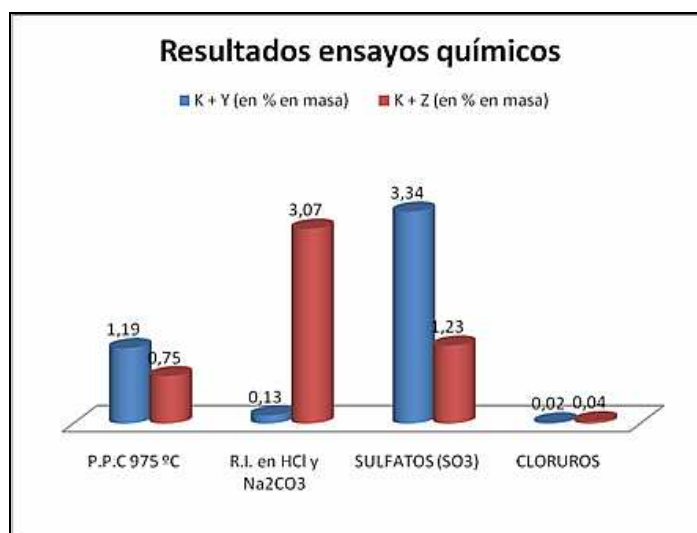


Figura Nº 3: Representación gráfica de los resultados del análisis químico de las mezclas (K+Z) y (K+Y).

De forma empírica, si se restan los porcentajes de sulfatos respecto a la pérdida por calcinación el valor obtenido será cercano a 2, que representa el número de moléculas de agua presente en la fórmula de un yeso normal (ver tabla VI). Teniendo en cuenta este planteamiento, se puede argumentar que el cemento elaborado con la mezcla (K+Y) es de buena calidad.

Las lecturas del tiempo inicial y final de fraguado fueron 95 y 135 minutos, respectivamente, mientras que el resultado de la expansión (estabilidad de volumen) fue igual a 0 mm; de este modo, queda determinado que la mezcla (K+Z) cumple con las exigencias recogidas en la norma europea (EN 196-3:2005).

Los resultados obtenidos con la primera amasada demostraron que la consistencia de la mezcla (K+Z) fue correcta, obteniéndose un mortero de trabajabilidad adecuada; este resultado satisfactorio sentó las bases para establecer el



procedimiento de elaboración, estudio e interpretación de los morteros ( $K+Y$ ) y ( $K+Z$ ) en esta investigación.

En las tablas VII, VIII y IX se exponen los resultados de los ensayos mecánicos a flexión y a compresión a las edades de 2, 7 y 28 días.

Tabla VII: Resistencias a flexión y a compresión de las mezclas ( $K+Z$ ) y ( $K+Y$ ) a la edad de 2 días.

EDAD	MUESTRA	LECTURAS A FLEXIÓN (kp)			Mpa	LECTURAS A COMPRESIÓN (N)			Mpa
2 días	K+ Z (1.1)	247,1	213,1	237,4	5,5	44760	45080	45990	28,3
						46110	44960	44560	
2 días	K+ Z (2.1)	247,1	223,2	260,1	5,7	47100	46440	47100	28,9
						47420	45450	44180	
2 días	K+ Z (3.1)	238,6	202,4	259,1	5,5	45440	45210	46180	28,3
						45610	44180	44830	
2 días	K+ Y (1)	319,9	291,6	316,4	7,2	58730	58950	56820	36,4
						57180	58710	59440	

Tabla VIII: Resistencias a flexión y a compresión de las mezclas ( $K+Z$ ) y ( $K+Y$ ) a la edad de 7 días.

EDAD	MUESTRA	LECTURAS A FLEXIÓN (kp)			Mpa	LECTURAS A COMPRESIÓN (N)			Mpa
7 días	K+ Z (1.2)	366,9	359,3	358,2	8,5	80740	80030	79200	50,1
						80340	79900	81200	
7 días	K+ Z (2.2)	312,3	290,1	336,1	7,3	77900	77880	80320	48,6
						77190	75800	77550	
7 días	K+ Z (3.2)	360,1	358,3	348,2	8,3	80740	79380	76200	49,5
						79330	79170	80680	
7 días	K+ Y (2)	290,9	312,8	390,1	7,8	81060	80400	80260	49,5
						76970	79290	77540	

Tabla IX: Resistencias a flexión y a compresión de las mezclas ( $K+Z$ ) y ( $K+Y$ ) a la edad de 28 días.

EDAD	MUESTRA	LECTURAS A FLEXIÓN (kp)			Mpa	LECTURAS A COMPRESIÓN (N)			Mpa
28 días	K+ Z (1.3)	357,3	380,7	348,1	8,5	96550	93030	94860	59
						94110	94080	94140	
28 días	K+ Z (2.3)	338,7	370,1	390,6	8,6	96770	94440	96880	59,2
						93860	91800	94340	
28 días	K+ Z (3.3)	340,1	329	318,9	7,7	96660	94860	92550	59,1
						97650	92680	93430	
28 días	K+ Y (3)	358,1	382,1	415,1	9	96990	90660	93180	59,3
						99010	97420	91680	

A la edad de 2 días, los valores de resistencias mecánicas de los morteros fabricados con la mezcla ( $K+Z$ ) son relativamente bajos, en relación con los del cemento de referencia ( $K+Y$ ) (ver figura 4). La zeolita, como otras puzolanas, ha producido notables “retardos” en el fraguado de la pasta y ha postergado el incremento de las resistencias hasta períodos comprendidos entre los 7 y los 28 días (ver tablas VIII y IX), por lo que puede considerarse como un regulador de fraguado idóneo.

El cemento de referencia ( $K+Y$ ) experimenta una rápida reacción hidráulica en el intervalo de tiempo de 0 a 2 días, lo que hace que el inicio de su curva se aleje considerablemente de las restantes. Esta divergencia puede considerarse como la diferencia entre los valores de las resistencias mecánicas alcanzados por un material en relación con otros dentro de una mezcla determinada e indica, además, la variabilidad del ritmo de la reacción hidráulica en el tiempo para alcanzar la resistencia dada.

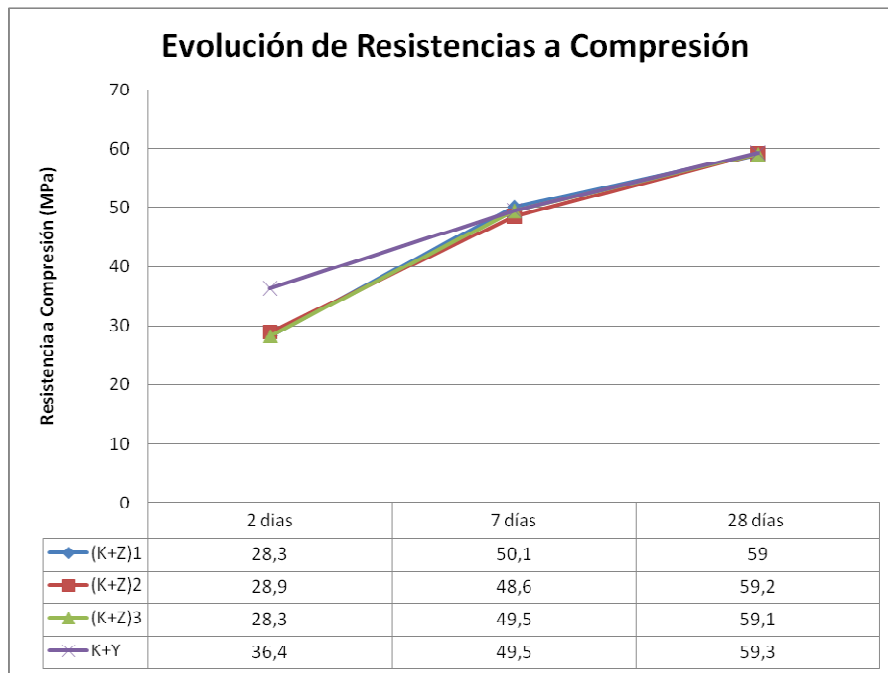


Figura Nº 4: Evolución de los valores de resistencias mecánicas.

Conviene destacar la visible convergencia de las curvas a la temprana edad de 7 días, o lo que es lo mismo, de los valores de resistencias mecánicas entre todas las curvas (ver figura 4). Esta aproximación puede ser explicada por la ausencia de yeso en los morteros fabricados con ( $K+Z$ ), y por el desencadenamiento de una fase más reactiva provocada por la presencia de la zeolita, que acelera el ritmo de la reacción por la saturación creciente en  $Ca(OH)_2$ .

En la figura 4 es evidente que las curvas que representan a las muestras de mortero fabricados con ( $K+Z$ ) alcanzan, incluso superan, los valores de la curva que identifica la resistencia mecánica del cemento de referencia ( $K+Y$ ) a la edad de 28 días.

Otro hecho a considerar es que todas las curvas superan el valor mínimo de resistencia exigido por la norma europea EN 196-1 a 28 días, para cementos de clase resistente 52.5 N (VMR=52.5 MPa).

## CONCLUSIONES

Los resultados preliminares expuestos en este trabajo establecen que las zeolitas, gracias a sus propiedades excepcionales, pueden ser utilizadas, a priori, como un regulador de fraguado. Sin embargo, de cara a las investigaciones ulteriores, se debe profundizar en el estudio de la evolución mineralógica y de las paragénesis

formadas como productos de la reacción de la mezcla (K+Z) con el agua. En este mismo orden, se debe determinar el grado de reactividad y/o nivel de saturación de los aluminatos tricálcicos, la posible presencia de aluminatos tetracálcicos, sales de candlot y tobermorita. De este modo, los morteros elaborados con (K+Z) deben ser minuciosamente estudiados, a fin de establecer sus propiedades reológicas en el más amplio sentido.

La trabajabilidad de las distintas amasadas de morteros fabricados con (K+Z), conforme a las cantidades reflejadas en el apartado seis de la norma europea EN 196-1:2005, es adecuada.

Los morteros preparados con (K+Z) exhiben valores bajos de resistencias iniciales a la edad de 2 días; sin embargo, el cemento de referencia (K+Y), adquiere resistencias cuyos valores son alrededor de un 20% más altos que los de (K+Z) a esa misma edad, demostrándose que la presencia de zeolita natural produce un sensible “retardo” en la velocidad de la reacción hidráulica y postergan la ganancia de resistencias mecánicas. La situación cambia drásticamente a partir de los 7 y 28 días, donde las resistencias de (K+Z) no sólo igualan las de (K+Y), sino que las superan.

## BIBLIOGRAFÍA

**Calleja, J** (2002). Normas españolas UNE 2002 para cementos. *Instituto español del cemento y sus aplicaciones* (IECA). 51 p.

**Calvo, B., Costafreda, J.L. y Estévez, E.** (2005). Caracterización preliminar de las zeolitas del yacimiento “Los Murcianos” Almería. *V Congreso Ibérico de Geoquímica, Soria*. 10 p

**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). Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución de fraguado de morteros de cemento. *XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*. 20 p.

**Costafreda, J. L. y Calvo, B.** (2008) Eficiencia de la Zeolita de cabo de Gata, Almería, en la elaboración de morteros con árido reciclado (RCD). *I Congreso Argentino de Áridos VI Jornadas Iberoamericanas de materiales de construcción, Mar del Plata, Argentina*. 12 p.

**Costafreda, J. L. y Calvo, B.** (2009) Análisis del comportamiento térmico de la paragénesis mordenita-esmectita de Cabo de Gata. *VII Congreso Ibérico. X congreso Nacional de Geoquímica*. Soria, España. 7 p.

**Dr. Phil. Fritz Keil** (1973). Cemento, fabricación – propiedades – aplicaciones. *Editores técnicos asociados, s.a.* pp 105 -110, 156 – 159.

**H. F. W. Taylor.** (1967). La química de los cementos. *Ediciones Urmo, vol. I.* pp 341 – 400 y 400 – 444.

**Michel Venuat y Michel Papadakis** (1996). Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones. *Ediciones Urmo*, pp 132 – 142.

**Miguel Ángel Sanjuán Barbudo** (2010). Determinación de los componentes del cemento. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGON, No 937.* 34 p.

**Norma Experimental UNE 80216:1991 EX** - Métodos de ensayo de cementos. Determinación cuantitativa de los componentes.

**UNE-EN 197-1:2000** - Cemento. Parte 1: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los Cementos comunes.

**UNE-EN 196-1:2005** - Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

**UNE-EN 196-3:2005** - Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

**UNE-EN 196-2:2006** - Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.

**UNE 80216:2010** – Métodos de ensayo de cementos. Determinación cuantitativa de los componentes.