



# COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN DE UN MORTERO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE ZEOLITA NATURAL EN DIFERENTES GRANULOMETRÍAS

---

Strength compressive behavior of a mortar with partial replacement of natural zeolite with different size

E.D. Perez-Diaz<sup>1\*</sup>, Juan Bosco Hernández Zaragoza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro,  
Querétaro, 76010, México

\*Autor de correspondencia  
eperez60@alumnos.uaq.mx

## RESUMEN

En este estudio, se analiza la influencia que tiene el tamaño de partícula de la zeolita natural en el comportamiento puzolánico. La zeolita empleada proviene del estado de San Luis Potosí, región centro-norte de México, y se presentan dos granulometrías distintas, una en polvo (pasa malla No. 200) y otra arena (30-100). El objetivo principal del presente trabajo es comparar, en distintas concentraciones, el carácter puzolánico de una zeolita natural en dos granulometrías, mediante un método indirecto sobre mezclas de mortero endurecido. En la metodología experimental, la resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial de 0, 10 y 15% es evaluada acorde a la normativa ASTM C-109. Se evidencia que una granulometría de este material puzolánico en el orden de 0.6 a 0.15 mm (malla 30-100) no presenta una contribución significativa en la resistencia mecánica a la compresión, alejando la posibilidad de una actividad puzolánica en cualquier concentración de zeolita natural. Esta zeolita natural en polvo se ha seleccionado para una caracterización fisicoquímica y puzolánica más profunda para posteriores investigaciones.

### Palabras Clave

Cemento puzolánico, Clinoptilolita, Material Puzolánico, Mortero binario, Reactividad Puzolánica, Zeolita natural.

### ABSTRACT

In this work, the influence of particle size of the natural zeolite on the pozzolanic behavior is analyzed. The zeolite used comes from the state of San Luis Potosí, central-north region of Mexico, and two different granulometries are presented, one powder (pass mesh No. 200) and another sand (30-100). The main objective of the present work is to compare, in different concentrations, the pozzolanic character of a natural zeolite in two granulometries, by an indirect method on hardened mortar mixtures. In the experimental metho-

dology, the compressive strength of mortar with partial substitution of 0, 10 and 15% is evaluated according to the ASTM C-109 standard. It is evident that a granulometry of this pozzolanic material in the order of 0.6 to 0.15 mm (30-100 mesh) does not present a significant contribution in the mechanical resistance to the compression, taking away the possibility of a pozzolanic activity in any concentration of natural zeolite. This natural zeolite powder has been selected for a deeper physicochemical and pozzolanic characterization for further investigations.

### Keywords

Pozzolanic cement, Clinoptilolite, Pozzolanic material, Binary cement, Pozzolanic reactivity, Natural zeolite.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tendencia de la tecnología de materiales de construcción obedece a la investigación de nuevos elementos, métodos, técnicas y materiales que aporten mayor eficiencia y rendimiento a la construcción y a su vez de prevenir, compensar y mitigar los daños causados al ambiente, esto siguiendo la política ambiental actual, donde establece reducir la cantidad de cemento necesaria en una mezcla de concreto, ya que su producción es ambientalmente desagradable debido al alto consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> atmosférico concomitantes (Gerilla et al., 2007). La atmósfera y el medioambiente en general, en las instalaciones de las industrias del cemento, está sujeta a una dura carga contaminante provocada por la emisión de partículas y agentes contaminantes, debido a las diferentes operaciones y métodos que son implementados (Cabrera and Romero, 2012). La producción de cemento Portland consume una alta cantidad de energía y materiales crudos, esta industria es responsable de las grandes cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas cada año, en un valor aproximado del 7% del total causadas por el hombre (Liguori et al., 2015).



Aproximadamente a comienzos del siglo XX, con el objetivo de disminuir la cantidad de cemento Portland, las puzolanas se han estado utilizando para la producción de mezclas de cementos, en los cementos puzolánicos, donde, el papel del material volcánico es reaccionar con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), componente formado por la hidratación del Clinker del cemento, para producir silicato de calcio hidratado adicional, mejorando de esta manera la resistencia del mortero endurecido (Taylor, 1997). Las tobas zeolíticas producto de la reacción de la ceniza volcánica depositada en lagos salinos son consideradas como un material natural con características puzolánicas (Rosell et al., 2010). La Asociación internacional del Concreto (Cement and Concrete Terminology and Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2002) define a las puzolanas naturales como un material compuesto por sílice y aluminio, los cuales por sí mismos no poseen propiedades aglomerantes, pero con un proceso de obtención de partículas más finas y con adición de agua se puede obtener un material con propiedades mecánicas benéficas para el cemento, el cual ayuda a obtener resistencias a la compresión mayores que las del concreto hidráulico convencional (Costafreda Mustelier et al., 2011). La ceniza volante, el humo de sílice, ceniza de bagazo de caña, ceniza de cascara de arroz, arcilla activada (e.g. metakaolin), entre otros, han sido otros de los componentes adicionales al cemento como material puzolánico que se han descubierto en el transcurso del pasado y presente siglo (Massazza, 2003), sin embargo, estos productos requieren de un tratamiento, en algunos casos de molienda, calcinación y/o procedimiento químico para su activación, elevando el costo del producto cementante.

La zeolita natural como material puzolánico para la sustitución parcial del cemento Portland se ha estudiado en los últimos años, convirtiéndose en un tema de considerable interés para la aplicación tecnológica de ma-

teriales en distintas disciplinas, industrias y en el medioambiente (Liguori et al., 2015). En la industria del cemento la zeolita natural ha sido aceptada como una excelente mezcla cementicia suplementaria. Al mezclar la zeolita con el cemento por la alta cantidad de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) reactiva que se combinan químicamente con el hidróxido de calcio, que es producido por la hidratación del cemento, para formar gel CSH (Silicato de Calcio Hidratado) y aluminatos adicionales (Ahmadi and Shekarchi, 2010), y con la reducción del contenido de poros por el mejoramiento de la zona de transición entre la zeolita mezclada en una pasta de cemento y agregados del concreto endurecido producen mejoras en la estructura del concreto (Feng et al., 1988). En este sentido, este material puzolánico permite mejorar propiedades mecánicas, resistencia a agentes químicos como el ataque de sulfatos, incrementar la durabilidad del material y su aplicabilidad permite reducir costos, lo anterior ha sido comprobado por algunos autores (Janotka and Krajči, 2008; Najimi et al., 2012; Uzal and Turanlı, 2012; Kocak et al., 2013; Valipour et al., 2013).

La pasada edición del atlas de los tipos de estructuras de la zeolita (Baerlocher et al., 2007), expone 176 únicos tipos de zeolita, donde, alrededor de 40 son naturales (Tschernich, 1992) y el resto han sido diseñadas y obtenidas en laboratorios para el uso de distintas industrias. Respecto a la tecnología del concreto en la construcción, los tipos de zeolitas más usados son encontrados en tobas sedimentarias zeolíticas dispersas alrededor del mundo, como lo son clinoptilolita, mordenita, fillipsita y chabazita (Colella et al., 2001). Los diferentes tipos, purezas y estructuras de la zeolita natural influyen en la durabilidad y en el desarrollo de la resistencia mecánica de la matriz de concreto en diferentes maneras y puede en algunos casos conducir a resultados contradictorios en estudios experimentales (Markiv et al., 2016). Sin embargo, las propiedades del concreto

con la adición de diferentes tipos de zeolita localizadas en varias regiones del mundo son parcialmente investigadas, pero en México las investigaciones acerca de las reactividad puzolánicas como las propiedades mecánicas y de durabilidad en una matriz de concreto no han sido suficientemente fuertes y relevantes para lograr el objetivo de ser aplicadas como material puzolánico en la preparación de mezclas cementantes, tales como, pastas, morteros y concretos en general, a pesar de que el territorio de México, en una proporción aproximada del 50%, es formada por secuelas volcánicas del tipo plioceno (Jimenez, 2004), el cual germina en diferentes estados del país presentando 30 depósitos de zeolita natural (Ortiz, 2001). De aquí la importancia de desarrollar investigaciones contundentes, que dejen de una manera precisa y clara la funcionalidad, la rentabilidad y la sustentabilidad de aplicar una sustitución parcial óptima de zeolita natural por cemento Portland en mezclas cementicias.

El objetivo principal del presente trabajo preliminar es comparar, en distintas concentraciones, el carácter puzolánico de una zeolita natural en dos granulometrías, mediante la resistencia a la compresión de mezclas de mortero endurecido. En la metodología experimental, la resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial del 0, 10 y 15% de zeolita natural para cada granulometría es evaluada acorde a la normativa ASTM C-109. De los resultados obtenidos se determinará la necesidad de una caracterización puzolánica más profunda por medio de investigaciones posteriores.

## **2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Materiales**

El material utilizado en este estudio incluye una arena comercial extraída en minas de la región de Querétaro, la arena fue usada como agregado fino para las mezclas de

mortero, se trabajó con un Cemento Portland Compuesto (CPC) 30R comercialmente disponible, con una gravedad específica de 3.14, la composición química se muestra en la tabla 1. Agua potable libre de impurezas fue utilizada para la preparación de las mezclas de mortero. La zeolita natural usada en este proyecto proviene de la Mina San Francisco ubicada en el estado de San Luis Potosí, centro-norte de México. La reactividad puzolánica depende entre otros factores de la granulometría del material puzolánico, de la mina se tomaron dos tipos de granulometrías, la zeolita en un aspecto de polvo, con un tamaño de partícula muy fino (pasa malla No. 200) y una zeolita en un aspecto de arena (30-100), el objetivo de la selección de zeolitas en diferentes granulometrías es evidenciar una reacción puzolánica en base a los resultados obtenidos en la resistencia mecánica a la compresión. Las composiciones químicas de los materiales son mostradas en la tabla 1. Un análisis químico es realizado a la zeolita mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), este análisis fue realizado por el Servicio Geológico de México y es reportado por la Mina San Francisco (tabla 2), el difractor de rayos X empleado es de la marca Bruker, modelo D8 Advance Da Vinci.

### **2.2. Métodos y preparación de muestras de cemento**

En este estudio, el cemento fue usado para la preparación de mezclas con zeolita y muestras de referencia. De acuerdo a la literatura, con el objetivo de observar una percolación posible, entre la matriz del mortero y la zeolita, que indique una reactividad puzolánica, se tomaron las siguientes concentraciones de zeolita natural: 0, 5, 10 y 15% con respecto al peso del cemento. Un total de 7 mezclas de mortero diferentes fueron realizadas y llamadas como C, Z5, Z10 y Z15 respectivamente para la zeolita en polvo y ZA5, ZA10 y ZA15 respectivamente para la zeolita en granulometría tipo arena.



Óxidos	Zeolita* (%)	CPC 30R (%)
SiO <sub>2</sub>	64.46	12.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.28	2.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13	8.80
CaO	2.59	62.71
MgO	0.50	0.62
SO <sub>3</sub>	-	4.28
FeO	1.23	-
Na <sub>2</sub> O	0.54	0.06
K <sub>2</sub> O	3.07	1.92
Cl	-	0.04
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6.81
MnO	-	0.15

**Tabla 1.** Composición química de la zeolita y el cemento (peso/peso).Nota: análisis semi-cuantitativo. \*fuente: Mina San Francisco.

De acuerdo al análisis químico mostrado, el principal componente mineralógico de la zeolita es identificado como clinoptilolita rica en potasio y sodio, además, la toba zeolítica también contiene, en menor cantidad, impurezas como lo es el cuarzo. La alta cantidad de fase cristalina activa, i.e. clinoptilolita, confirma una actividad puzolánica para esta zeolita natural. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C-618 el contenido mínimo en la sumatoria de SiO<sub>2</sub> mas Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mas Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> debe ser 70% para lograr catalogarse como material puzolánico. Conforme

Proporción (%)	Mineral	Composición química
Mas de 25	Clinoptilolita	(Na,K) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>36</sub> O <sub>22</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	Heulandita	CaAl <sub>7</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>18</sub> ·6H <sub>2</sub> O
De 10 a 25	Estilbita	(Ca,Na) <sub>13</sub> (Si,Al) <sub>9</sub> O <sub>18</sub> ·8H <sub>2</sub> O
	Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
De 1 a 10	Anorthoclasa	(Na <sub>0.7</sub> K <sub>0.3</sub> )(Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>8</sub> )
	Montmorillonita sódica	Na <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> OH <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
De 0.1 a 1	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	Biotita	K(Fe,Mg) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>

\*fuente: Mina San Francisco.

**Tabla 2.** Composición mineralógica de la zeolita

a la tabla 1 la zeolita contiene una suma de 77.87%, por lo tanto, este material en este estudio muestra químicamente ser una puzolana adecuada para reaccionar con el cemento. Al introducir clinoptilolita, que contiene grandes cantidades de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en una mezcla de cemento se produce una reacción puzolánica que permite modificaciones de la composición de fases de productos de hidratación de cemento con la formación de una cantidad extra de hidrosilicatos de calcio (CSH y CSAH), mejorando la estructura de poros de la mezcla de cemento y en consecuencia las propiedades mecánicas y de durabilidad (Markiv et al., 2016; Janotka and Krajči, 2008). Por lo tanto, La resistencia a la compresión es un parámetro capas de valorar de forma indirecta una actividad puzolánica, debido al observar cambios en las propiedades mecánicas del material.

### 2.2.1. Resistencia a la compresión

Una muestra de CPC fue realizada como referencia (C). las siguientes cantidades son las proporciones utilizadas para un lote de seis especímenes de mezcla de mortero, utilizada en la prueba de resistencia a la compresión, 500 g de CPC, 1325 g de agregado fino y una relación de agua-cemento de 0.5. El mezclado es realizado con una máquina revolvedora conforme a la ASTM C-305. Las

mezclas con zeolita natural guardan las mismas proporciones anteriormente mencionadas más una dosis de agua adicional para mantener una fluidez similar a la mezcla de control, la cantidad de agua fue controlada mediante el ensayo de la mesa de fluidez.

Las proporciones de las mezclas de mortero son presentadas en la tabla 3. Los morteros fueron preparados en moldes cúbicos de 50x50x50 mm conforme a la ASTM C-109. Los especímenes fueron guardados por 24 h. Al final de esta duración, los especímenes fueron desmoldados y curados acordes a la norma ASTM C-192. Los especímenes fueron ensayados a compresión acorde a la ASTM C-109 a una edad de curado de 28 días.

Los resultados de las muestras binarias serán comparados como un porcentaje de la resistencia de la muestra de control según la Ec. (1).

$$\left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A = promedio de la resistencia a la compresión de las mezclas puzolánicas, MPa, y

B = promedio de la resistencia a la compresión de la muestra de control, MPa.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia en morteros es una importante propiedad que determina su calidad como material apto para la construcción. La resistencia a la compresión de las distintas muestras de mortero binario son mostradas en la Figura 1, junto con los resultados de la muestra control. En el eje de las ordenadas se encuentran los valores máximos de resistencia a la ruptura en MPa, y en la abscisa x se encuentran las distintas muestras ensayadas a 28 días de edad de curado.

De los resultados obtenidos se destacan tres puntos importantes: en primer lugar, la resistencia a la compresión de la muestra de control a los 28 días de edad es mayor a

Identificación de mezclas	Zeolita* (g)	Cemento (g)
Control	0	500
Z5	25	475
Z10	50	450
Z15	75	425

**Tabla 3.** Proporción de mezclas.

\*Especificaciones iguales para las dos granulometrías. Nota: las siguientes especificaciones son válidas para todas las mezclas: a/c = 0.5, arena= 1325 g. fuente: datos propios.



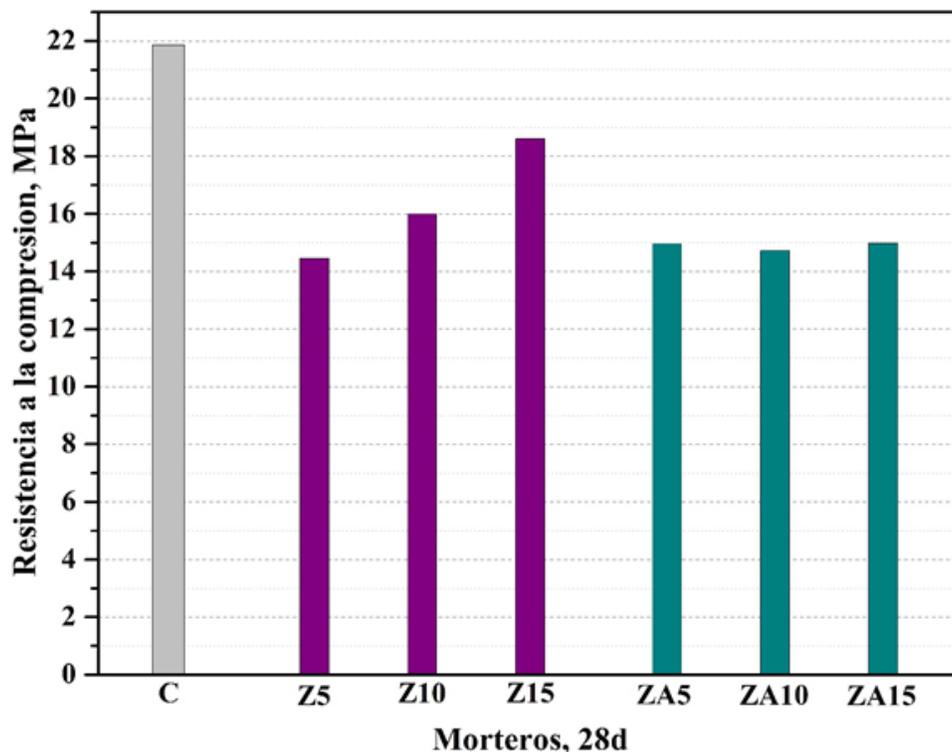
los valores obtenidos por cualquier sustitución parcial ensayada. En segundo punto, se observa que la resistencia a la compresión, sobre las muestras Z5, Z10 y Z15, tiene un incremento debido a la sustitución parcial de cemento por zeolita natural. En la Figura 1 se evidencia un comportamiento de relación proporcional, al aumentar la concentración de zeolita natural un incremento en la resistencia mecánica es observado, logrando un posible umbral de percolación en un 15% de sustitución aproximadamente e incitando una reacción puzolánica. Como tercer punto, una sustitución de zeolita natural granular con tamaño de partículas del orden de 0.6 a 0.15 mm (malla 30-100) no presentó un cambio significativo en la resistencia, con una sustitución del 5% se obtuvo un valor similar en la resistencia con concentraciones del 10 y 15%, este comportamiento se debe posiblemente a que la partícula de zeolita está trabajando como un agregado fino y no como material puzolánico en su totalidad.

Conforme con la norma ASTM C-311 un ma-

terial puzolánico natural en una sustitución del 20% debe alcanzar como valor mínimo el 75% de la resistencia de una muestra de control a los 7 o 28 días de edad. Acorde a lo anterior la muestra de control alcanzó una resistencia de 21.86 Mpa en promedio, valor máximo entre todos los especímenes.

La zeolita de granulometría polvo para un porcentaje de 15% logró desarrollar un 85% (calculado con Ec. (1)) de la resistencia mecánica de la muestra de referencia ensayada a los 28 días. El resultado alcanzado no asegura que una sustitución del 20% se encuentre por arriba del mínimo valor de resistencia establecido por la normativa internacional, sin embargo, una actividad puzolánica es producida por el incremento de zeolita pasando de 66% para Z5 hasta 85% para Z15. Se estima un incremento de esta propiedad al alcanzar una concentración del 20%.

Distintos investigadores reportan que una sustitución de zeolita entre el 10 y 20% contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas superando a la muestra de referencia



**Figura 1.** Resistencia a la compresión de morteros binarios a base de zeolita natural y mortero de cemento convencional.

(Najimi et al., 2012), dependiendo de la reactividad puzolánica de la zeolita natural y su contenido de sílice y alúmina reactiva (entre 65% y 80%).

La teoría de percolación señala un cambio en las propiedades a partir del 17.5% (umbral de percolación) para materiales de forma esférica (Yin, 2000), por lo tanto, acorde a los resultados obtenidos será necesario en posteriores estudios analizar el comportamiento de esta propiedad mecánica con un número mayor concentraciones iniciando en 10 o 15% de zeolita natural en polvo, además evaluar el comportamiento a distintas edades de curado. En este sentido, una caracterización sobre las propiedades de durabilidad del material es requerida una vez se determinen las óptimas concentraciones de zeolita natural en términos mecánicos.

Para sustituciones mayores al 20% la trabajabilidad de la mezcla disminuye, la cantidad de agua mínima para alcanzar a reaccionar el cemento es afectada con el aumento de la zeolita, el requerimiento de agua para mantener una fluidez similar a una muestra convencional aumenta conforme crece el porcentaje de zeolita sustituido (Uzal and Turanli, 2012; Janotka and Krajci, 2008).

La finura o área superficial de la zeolita es un factor que incide en la demanda de agua afectando las propiedades anteriormente mencionadas, la zeolita en su estructura porosa con micro cavidades definidas y tiene una finura mayor que el cemento, consecuentemente, el uso de aditivo fluidificante podría ser un elemento indispensable para sustituciones mayores al 20% favoreciendo la reducción de agua sin alterar las propiedades mecánicas.

#### 4. CONCLUSION

La resistencia promedio a la compresión de la muestra control fue superior a los resultados obtenidos por la sustitución parcial de CPC por zeolita natural en las granulometrías

y concentraciones estudiadas.

Sin embargo, se logra destacar que la sustitución parcial de un 5, 10 y 15% de zeolita natural (polvo), en una mezcla de mortero de cemento Portland compuesto, aumenta el desempeño mecánico de un valor de 66% hasta un 85% respectivamente, demostrando con este resultado una reacción puzolánica.

De acuerdo al incremento de la resistencia la zeolita natural de granulometría polvo, tipo clinoptilolita, presenta una reactividad puzolánica evaluada de forma indirecta mediante la determinación del desempeño mecánico.

Por otra parte, no existe una reacción puzolánica significativa para un tamaño de partícula granular entre 0.6 y 0.15 mm de zeolita natural, debido a que este material se encuentra dentro de la matriz cementante como agregado fino sin lograr un consumo significativo de portlandita.

La relación agua-cemento incrementa con el aumento de la cantidad de zeolita natural (polvo), sin embargo, se evidencia el aumento de la resistencia mecánica en las concentraciones del 5 al 15%. La trabajabilidad de la mezcla de mortero disminuye con el incremento de zeolita natural (polvo), aumentando así, la relación agua-cementante, en concentraciones mayores el uso de un fluidificante sería una alternativa para mantener una relación de agua-cemento constante y analizar el comportamiento puzolánico sin una posible afectación en la resistencia mecánica.

El consumo de cemento Portland compuesto se logra disminuir en un 15% con la sustitución de zeolita natural en granulometría polvo, logrando resistencias a la compresión aceptables para la normativa internacional ASTM.

En otro sentido, en distintos lugares de Mé-



xico el acceso a las materias primas es muy fácil, el transporte de materiales a los sitios de construcción no es un factor que influye en el alzado del presupuesto de la obra, mientras que el cemento comercial es uno de los insumos más costosos en este país, por lo que las puzolanas naturales extraídas de las minas como materia prima para mezclas de cemento suelen ser económicas y abundantes, por lo tanto, es esencial tomar recursos cercanos. La zeolita natural y puzolana en general enfocada en materiales para la construcción está aumentando, debido a la demanda de edificios modernos y el comercio en general, una aplicación a esta puzolana es la realización de mezclas de cemento como estuco naturales o morteros en cualquier tipo de vivienda.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en el transcurso de esta investigación. Los autores están agradecidos con la Mina San Francisco por el apoyo con el material y estudios químicos otorgados.

## REFERENCIAS

Ahmadi, B., and M. Shekarchi. 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Compos.* 32:134–141.

Baerlocher, C., L. B. McCusker, and D. H. Olson. 2007. *Atlas of Zeolite framework types*. Sixth. Elsevier Ltd, Amsterdam, The Netherlands.

Cabrera, H. R., and J. L. Romero. 2012. Mejoras en los impactos ambientales. *Univ. y Soc.* 4:1–8.

Cement and Concrete Terminology,

C., and I. Instituto mexicano del Cemento y del Concreto. 2002. Terminología del cemento y del concreto: ACI 116R-00. Instituto mexicano del Cemento y del Concreto. Available from: [https://books.google.com.mx/books?id=E1K\\_YgEACAAJ](https://books.google.com.mx/books?id=E1K_YgEACAAJ)

Colella, C., M. De Gennaro, and R. Aiello. 2001. Use of Zeolitic Tuff in the Building Industry. *Rev. Mineral. Geochemistry.* 16:551–586. doi:10.2138/rmg.2001.45.16.

Costafreda Mustelier, J. L., B. Calvo Pérez, and J. L. y Alfaro. 2011. Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones.

Feng, N., Y. Li-hong, and Z. Hsiaming. 1988. the strength effect of mineral admixture on cement concrete. *Cem. Concr. Res.* 18:464–472.

Gerilla, G. P., K. Teknomo, and K. Hokao. 2007. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Build. Environ.* 42:2778–2784.

Janotka, I., and L. Krajčí. 2008. Sulphate resistance and passivation ability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite. *J. Therm. Anal. Calorim.* 94:7–14. doi:10.1007/s10973-008-9180-2.

Jimenez, M. 2004. caracterización de minerales zeolíticos mexicanos. universidad autónoma del estado de México.

Kocak, Y., E. Tasci, and U. Kaya. 2013. The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Constr. Build. Mater.* 47:720–727.

Liguori, B., F. Iucolano, B. De Gennaro, M. Marroccoli, and D. Caputo. 2015. Zeolitized tuff in environmental friendly production of cementitious material: Chemical and mechanical characterization. *Constr. Build. Mater.* 99:272–278.

Markiv, T., K. Sobol, M. Franus, and W. Franus. 2016. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Arch. Civ. Mech. Eng.*

Massazza, F. 2003. Pozzolana and Pozzolanic Cements. *Lea's Chem. Cem. Concr.* 15:471–635.

Najimi, M., J. Sobhani, B. Ahmadi, and M. Shekarchi. 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Constr. Build. Mater.* 35:1023–1033.

Ortiz, L. E. 2001. Criterios y especificaciones concernientes a la exploración y valoración de minerales en la República Mexicana.

Rosell, M., R. Galloso, and B. Calvo. 2010. Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. *Boletín Geológico y Min.* 117:783–792.

Taylor, H. F. W. 1997. *Cement Chemistry*. Thomas Telford. Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=1BOETtwi7mMC>

Tschernich, R. W. 1992. *Zeolites of the World*. Harbinger House.

Uzal, B., and L. Turanli. 2012. Blended cements containing high volume of natural zeolites: Properties, hydration and paste microstructure. *Cem. Concr. Compos.* 34:101–109.

Valipour, M., F. Pargar, M. Shekarchi, and S. Khani. 2013. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Constr. Build. Mater.* 41:879–888.

Yin W., and Tao R. 2000. Algorithm for finding two-dimensional site percolation backbones. *Elsevier Science, Physica B* 279: 84-86.