






Comparativa del impacto de la diatomita, perlita y zeolita en el comportamiento térmico y estructural del mortero

Comparison of the impact of diatomite, perlite and zeolite on the thermal and structural behavior of the mortar

E. S. Flores-Lozano ^{a*}, I. R. López-de-Juambelz ^b, D. Velázquez-Vázquez ^c, E. Moreno-Pérez ^d,
J. Hernández-Ávila ^e

^a Estudiante de doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.

^b Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.

^c Facultad de Estudios superiores Aragón de la Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 57130, Nezahualcóyotl, Estado de México, México.

^d Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo, Km 4.5 s/n, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P. 42184, México.

^e Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo, Km 4.5 s/n, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P. 42184, México.

Resumen

En este artículo se estudiaron las características de seis morteros puzolánicos creados sustituyendo un porcentaje del volumen de la arena por uno similar de diatomita, perlita o zeolita dentro de la mezcla. Después se definió con pruebas de placa caliente aislada y ensayo de compresión, los cambios generados por dicha modificación en los coeficientes de conducción térmica (λ) y la resistencia de estos morteros en comparación con una mezcla control. Esto se realizó porque, aunque las puzolanas naturales se han estudiado previamente como una opción para crear concretos ecológicos o elementos arquitectónicos aligerados, no se ha establecido claramente el impacto que generan en el comportamiento térmico de las pastas cementantes. Finalmente, la validación experimental demostró que la zeolita fue el mineral con el que se crearon los morteros con mejor relación entre funcionamiento térmico y resistencia, reduciendo hasta en una tercera parte el coeficiente de conducción térmica del material, pero menos del 10% de su resistencia a compresión.

Palabras Clave:

Zeolita, Diatomita, Perlita, Mortero, Coeficiente de conducción térmica, ensayo de compresión.

Abstract

In this article, the characteristics of six pozzolanic mortars created by substituting a percentage of the volume of the sand for a similar one of diatomite, perlite or zeolite within the mixture were studied. Afterwards, the changes generated by said modification in the thermal conduction coefficients (λ) and the resistance of these mortars in comparison with a control mixture were defined with insulated hot plate tests and compression tests. This was done because, although natural pozzolans have been previously studied as an option to create ecological concretes or lightened architectural elements, the impact they generate on the thermal behavior of cementitious pastes has not been clearly established. Finally, the experimental validation showed that zeolite was the mineral with which the mortars with the best relationship between thermal performance and resistance were created, reducing the thermal conduction coefficient of the material by up to a third part but less than 10% of its compressive strength.

Keywords:

Zeolite, Diatomite, Mortar, Coefficient of thermal conduction, compression test.

1. Introducción

En la actualidad las pastas cementantes como el concreto y el mortero, son dos de los materiales más utilizados dentro de las construcciones. Sin embargo, aunque poseen muy buenas características estructurales, también tienen altos coeficientes de conducción térmica, lo que los convierte en malos aislantes

térmicos y a su vez, en uno de los factores que contribuyen a la generación del fenómeno de isla de calor urbana (UHI) en las ciudades.

Para mejorar el funcionamiento térmico del mortero se buscan opciones económicas y de carácter ecológico por su forma de obtención a partir de elementos naturales. Ante estas premisas se

*Autor para la correspondencia: euniseflores30@gmail.com

Correo electrónico: euniseflores30@gmail.com (Eunise Sarai Flores-Lozano), rocio.ldej@gmail.com (Isabel Rocío López de Juambelz), danvel@unam.mx (Daniel Velázquez-Vázquez), emiliano_moreno@uaeh.edu.mx (Emiliano Moreno Pérez), herjuan@uaeh.edu.mx (Juan Hernández Ávila)

decidió agregar puzolanas a la mezcla del material, dado que estos materiales poseen características aislantes y además contribuyen a la aglutinación de la pasta (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018), (Chacón Sánchez & Astete García, 2015), (Raggiotti, Positieri, Locati, Murra, & Marfil, 2015), (Andrada, y otros, 2012).

Entre las puzolanas naturales se seleccionaron diatomita, perlita y zeolita porque aumentan la porosidad de la mezcla y retienen humedad. Se diseñó un modelo experimental factorial que constó de seis unidades fabricadas con mortero de cemento-arena 1:3, a las cuales se les sustituyó la arena por una puzolana, con el fin de establecer la mezcla idónea que permita un menor coeficiente de conductividad térmica, sin modificar la resistencia a la compresión.

2. Metodología

2.1. Preliminares

2.1.1 Composición de la mezcla control

El objetivo del experimento desarrollado se basa en la modificación de la mezcla de mortero para lograr la disminución del coeficiente de conducción térmica, pero conservando el resto de las características físicas. Por esto, resultó fundamental establecer primero la composición del mortero que se usó como base para la realización de este experimento.

Según la NMX-C-021-ONNCE-2015, el nombre técnico correcto para la mezcla elaborada con cementante hidráulico, arena y agua es *cemento de albañilería*, aunque comúnmente en nuestro país se le conozca como mortero.

Existen diversas proporciones para elaborar *cemento de albañilería* a fin de proporcionarle una mayor resistencia. Sin embargo, la más utilizada a nivel nacional a fin de elaborar morteros para acabados, es la proporción cemento-arena 1:3, por tanto, es la que se utiliza en este trabajo; en la norma N-CMT-2-01-004/02, emitida por la SCT, se considera a los morteros elaborados con la proporción 1:3 como de tipo I, de los que se espera una resistencia de 127 kg/cm², como se aprecia en la tabla 1. Asimismo, la norma ASTM C-270 y ASTM C-780 divide a los morteros con dicha proporción en M, S o N y sus resistencias esperadas también se aprecian en dicha tabla.

Con base en lo anterior, se puede destacar que se solicita la misma resistencia para el mortero tipo I en la SCT que para el S de la ASTM C-270 y ASTM C-780, siendo entonces 127 kg/cm² la resistencia mínima que se espera que alcance la mezcla control.

Tabla 1: Composición y resistencia del mortero con proporción cemento-arena 1:3

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de arena	Resistencia mínima MPa (kg/cm ²)
I	1.0	2.5 – 4.0	12.5 (127)
M	1.0	2.0 – 3.5	17.5 (178)
S	1.0	2.0 – 3.5	12.5 (127)
N	1.0	2.0 – 3.5	7.5 (76)

En cuanto al agua, para lograr esta resistencia, la proporción de cemento-agua indicada por la curva de Abrams (Figura 1) es de 1:0.95, o hasta lograr una fluidez de 110% ± 5% (IMCYC, 2011).

Sin embargo, previendo que la presencia de puzolanas naturales en la pasta cementante pudiera reducir su resistencia

mecánica, se decidió aumentar la resistencia esperada de la mezcla control a fin de que todas las unidades experimentales elaboradas con puzolanas, cumplan con la resistencia mínima de 127 kg/cm².

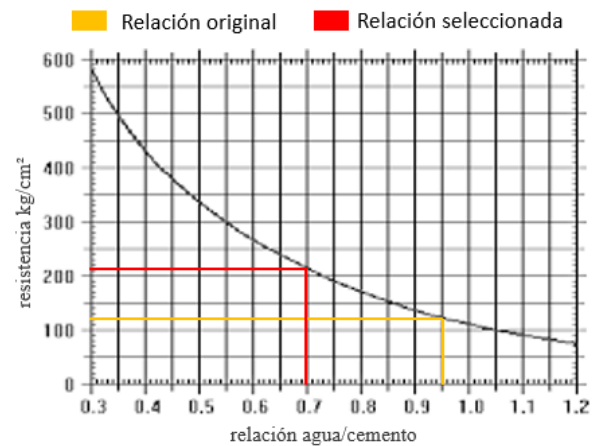


Figura 1: Relación agua cemento seleccionada para la mezcla control

La propuesta para lograrlo se basó en la premisa que sostiene que “a menor agua, mayor resistencia” (Quintero Ortiz, Cruz Hernández, & Peña Santos, 2014), por lo que se aumentó la resistencia del mortero reduciendo la cantidad de agua en la composición, dejando una relación cemento-agua de 1:70, esperando obtener un F^c de 210 kg/cm² (Figura 1), esperando así cumplir con la resistencia solicitada para los morteros tipo M (Tabla 1).

Como agregado fino se empleó arena de río tipo riolítica y se determinó su granulometría mediante tamices en un rango que fue de 4 a 0.2 mm y los datos obtenidos se incluyeron en el apartado de resultados.

La mezcla control también se reforzó con fibra de vidrio, ya que este material incrementa el aislamiento térmico y aumenta la resistencia a la tracción y flexión de los morteros; habiéndose utilizado la fibra de vidrio tipo AR porque ofrece resistencia a los compuestos alcalinos (Águila Higuero, 2010).

Con respecto a la cantidad de fibra de vidrio a usar, se utilizó la proporción indicada para refuerzos en piezas de fachada, equivalente al 5% del volumen de la mezcla (Comino & Romero, 1996). Sin embargo, para comprobar dicha información se realizaron ensayos previos, cuyos productos se incluyeron en el apartado de resultados.

Por último, a continuación, se muestra la lista final de materiales usados en la elaboración de la mezcla control:

- Cemento: de la marca CEMEX tipo blanco con el código CPO-30 B
- Arena riolítica de río
- Agua potable (sin aceites, grasas o impurezas apreciables)
- Refuerzo de fibra de vidrio tipo AR

Tras definir la composición de la mezcla control, a continuación, se procedió a realizar el diseño de las otras seis mezclas de mortero que fueron estudiadas.

2.2. Diseño experimental

Los experimentos en general se encuentran conformados por tres componentes: Constantes, Variables independientes y variables dependientes. A continuación, se explicará a detalle

cómo se aplicaron estos tres factores en la creación de las unidades experimentales:

2.2.1 Constantes

Son los factores que se mantienen iguales en todas las unidades experimentales. Las constantes que se manejaron dentro de las mezclas de las unidades experimentales y que se utilizaron de forma idéntica dentro de la mezcla control, fueron:

- Tipo y cantidad de cemento a emplear
- Tipo de arena usada
- Tipo y cantidad de Fibra de vidrio

2.2.2 Variables independientes

Son las variables que se modifican por los investigadores con el objetivo de apreciar los resultados en un experimento. En este trabajo se manejaron dos tipos de variables independientes:

- Tipo de puzolana natural usada como sustituto de arena
- Porcentaje de sustitución de arena en la mezcla

Previo a la elección de las puzolanas naturales a emplear se estudiaron muchos tipos, sin embargo, finalmente se eligieron a la diatomita, perlita y zeolita porque poseen un bajo coeficiente de conducción térmica y existen numerosos yacimientos de estos materiales a nivel nacional, lo que garantiza su accesibilidad. A continuación, se explica la definición y funcionamiento térmico de estos materiales:

Perlita: Es un vidrio volcánico y, por tanto, un mineraloide. Su composición es de un silicato e incluye un porcentaje de $\pm 5\%$ de agua, lo que le permite expandirse hasta 20 veces de su volumen original cuando es sometido a temperaturas entre 760 y 1100 °C, conociéndose entonces como *perlita expandida*. Con el proceso de expansión, este material adquiere una textura porosa, baja densidad y capacidades aislantes (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2003).

Por su bajo peso e inercia química, la perlita principalmente se utiliza en la jardinería y la horticultura, así como en la elaboración de morteros (Fideicomiso para el fomento minero, 1997). Se eligió este material porque además de todo lo anterior, posee una gran capacidad para retener agua en su superficie.

Respecto a su granulometría, la perlita expandida se maneja comercialmente en un grano de 5 mm o menor (Fideicomiso para el fomento minero, 1997). En cuanto al color, las tres puzolanas empleadas en este trabajo se caracterizaron utilizando la escala Munsell para color de rocas, obteniendo en el caso de la perlita el código 10YR 8/1 White.

Diatomita: Es un mineraloide de composición rica en sílice, conformado por la acumulación sedimentaria de esqueletos fosilizados de las frústulas de las algas diatomeas. Estos esqueletos están formados por dos valvas con forma de plato e interior ahuecado que, además, poseen un sistema de aberturas en cada valva (Chacón Sánchez & Astete García, 2015).

Esta composición de valvas ahuecadas es la que le confiere a la diatomita una alta porosidad, baja densidad y baja conductividad térmica y la hacen idónea para realizar procesos de filtración (Dirección General de Desarrollo Minero, 2017), mismos motivos por lo que fue seleccionada.

Respecto a la granulometría, la diatomita se explota en bancos de material a cielo abierto y se somete a un proceso de molienda hasta que cumpla con cualquier especificación solicitada (Borgel

Espinoza, 2007). Por último, su código de color según la escala Munsell fue 10YR 8/2 Very Pole Orange.

Zeolita: Es el nombre de una familia de aluminosilicatos hidratados que cuentan con una estructura con poros que van de los 3 a los 10 angstroms (Bosch & Schifter, 1997). Las zeolitas tienen una alta resistencia a los sulfuros y se utilizan en muy diversos usos, tales como catalizadores, desecantes o filtros moleculares. Fueron integradas a este trabajo por su capacidad de “hidratación reversible”, la cual les permite adsorber moléculas de agua del aire y liberarlas cuando aumenta la temperatura a su alrededor, obteniendo así capacidades de aislamiento térmico (Lorrio Domene, 2011).

En cuanto a la granulometría, las zeolitas son explotadas en yacimientos a partir de los cuales, sometidas a un proceso de molienda, se pueden adaptar a cualquier requerimiento.

Existen muchos tipos de zeolitas naturales, pero se utilizó el tipo clinoptilolita-heulandita, ya que su tamaño de poro la hace compatible con este trabajo (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018), además de ser el tipo más abundante a nivel nacional. Con respecto a la coloración de este material, se determinó que su código de color fue 5Y 8/1 Yellowish Gray.

En la tabla 2 se pueden apreciar algunas otras de las principales características físicas de la perlita, diatomita y zeolita.

Tabla 2: Características de las puzolanas naturales utilizaron en este trabajo

Material	Coficiente de conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (Kg/m3)	Punto de Fusión (°C)
Diatomita	0.057	320-640	1400 – 1750
Perlita	0.040-0.060	30-150	1260 – 1343
Zeolita	0.035	580-840	1200 - 1400

Respecto al diseño de las mezclas de las unidades experimentales, se decidió utilizar diatomita, perlita y zeolita en una granulometría similar a la de la arena de río, a fin de obtener características físicas similares y garantizar la comparabilidad entre los resultados.

En cuanto a la sustitución de arena por diatomita, perlita o zeolita, con base en estudios previos (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018) (Raggiotti, Positieri, Locati, Murra, & Marfil, 2015), se decidió crear unidades experimentales que tuvieran el 25 y el 50% de sustitución respectivamente, creando así dos mezclas por cada una de las puzolanas seleccionadas.

2.2.3 Variables dependientes

Esta clase de variables, son aquellas que responden ante el efecto de las variables independientes y, sobre todo, son las que se toman en cuenta para determinar los resultados de los experimentos. Las variables dependientes que se consideraron en este trabajo fueron:

- El coeficiente de conducción térmica
- La resistencia a la compresión

Existen varios factores para determinar el comportamiento térmico de los distintos materiales, sin embargo, la principal propiedad para caracterizarlo es el coeficiente de conductividad térmica (λ), ya que con base en él se pueden calcular otros elementos como la resistencia térmica.

El coeficiente de conductividad térmica se define como la relación entre el calor transportado a través de un cuerpo, por

unidad de tiempo y el gradiente de temperatura (W/m.K) (Rivero Nogueiras, 2016).

Por último, se seleccionó a la resistencia a la compresión como un factor a tomar en cuenta porque las mezclas cementantes suelen trabajar bajo esta clase de esfuerzos y reforzarse con acero u otros materiales para soportar las cargas a tensión o tracción (Rivera L., 2009).

2.2.4 Diseño de las unidades experimentales

Con base en todo lo anterior, el diseño más adecuado para este trabajo fue uno del tipo factorial. Este tipo de experimentos se definen como aquellos en los que se estudian dos o más factores y donde las unidades experimentales son todas las posibles combinaciones de los factores seleccionados.

En este caso, se utilizó un modelo de 3 x 2 niveles (Figura 2), lo que causó la creación de seis unidades experimentales, de las que se puede apreciar su composición y clave en la tabla 3.

Por último, cumpliendo con lo establecido por el método científico, a cada una de las unidades experimentales se le efectuaron tres repeticiones de cada una de las pruebas que se les realizaron.



Figura 2: Esquema del experimento factorial aplicado en este trabajo

Tabla 3: Composición y nombre de las mezclas estudiadas

Puzolana agregada	Clave del mortero	Porcentaje de sustitución del volumen de arena
Ninguna	T0	0%
Diatomita	D25	25 %
Diatomita	D50	50 %
Perlita	P25	25 %
Perlita	P50	50 %
Zeolita	Z25	25 %
Zeolita	Z50	50 %

2.3 Elaboración de unidades experimentales

Para la determinación del coeficiente de conductividad térmica y la resistencia a compresión de las siete mezclas de mortero estudiadas, se tuvieron que generar dos tipos de probetas:

- Placas de 30 x 30 x 2.5 cm para la prueba de placa caliente aislada
- Cilindros de 10 x 20 cm para el ensayo a compresión

Las placas se crearon utilizando moldes de vidrio y madera hechos a la medida. Debido a la mínima cantidad de agua que se

utilizó en los morteros, la trabajabilidad de las mezclas se redujo, obteniendo un resultado de 3-4 cm en la prueba de revenimiento, el cual fue similar en todas. Sin embargo, se realizaron algunas observaciones durante la preparación de las mezclas:

- Ya que la perlita expandida posee una densidad menor a la del agua, el mezclado de los morteros que la incluían tuvo que realizarse con mayor cuidado y tiempo que los que incluían diatomita o zeolita, a fin de garantizar que este material se integrara de manera uniforme al resto de la mezcla.
- Por la capacidad de adsorción de agua de la zeolita, las mezclas de morteros que la incluían perdían humedad con mayor velocidad que las otras, por lo que era necesario trabajar lo más rápido posible con este material, a fin de no rehidratarlo de manera significativa.
- Las mezclas de mortero elaboradas con diatomita fueron las que presentaron un comportamiento con mayor similitud al de la mezcla control.

Tras la preparación previa del molde, se realizaba el colado de la pieza procurando compactar la mezcla del mortero con una varilla. También se le daban golpes con un mazo de goma a fin de sacar la mayor cantidad de aire posible del material. Una vez llenado el molde, se cubría con una película plástica y se le dejaba reposar. El desmolde de la placa se llevaba a cabo después de 24 horas, colocándola posteriormente dentro de agua con cal para el curado de la pieza.

Las placas se colaban en juegos de tres y se les podía realizar el examen desde los 14 días de edad, sin embargo, se procuraba efectuarla cuando las muestras ya contaban con 28 días (Figura 3).



Figura 3: Placas de 30 x 30 cm para la prueba de placa caliente aislada

Con respecto a las probetas para el ensayo de compresión, el procedimiento para generarlas se encuentra explicado dentro de las normas NMX-C-083-ONNCCE-2004 y la NMX-159-ONNCCE-2004. Para generar estas muestras, se utilizaron moldes de metal que fueron facilitados por el laboratorio cuatro de la Facultad de Estudios Superiores Aragón.

El procedimiento para generar los cilindros consistió en llenar los moldes en tres etapas, procurando realizar 25 penetraciones con una varilla de 10 mm de diámetro en cada una de las etapas,

procurando que la varilla atravesara hasta la etapa anterior de la mezcla para lograr una buena compenetración entre el material. También se golpeaba el molde con un mazo de goma cada vez que se colocaba una capa de cemento a fin de sacar todo el aire posible (IMCYC, 2011).



Figura 4: Curación de las probetas para ensayo de compresión

Cuando el molde se terminaba de llenar, se le colocaba una película plástica para evitar que la mezcla perdiera agua por evaporación y se dejaba fraguar de 24 a 36 horas antes del desmolde (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006).

Una vez que se desmoldaban las probetas, se colocaban dentro de una pileta con agua saturada al 2% con cal y se les dejaba curar hasta que cumplieran los días necesarios para realizar el ensayo, tal como se aprecia en la figura 4.

El día de la prueba, previo a ejecutarla, los cilindros se cabeceaban con azufre caliente, siguiendo lo indicado por el IMCYC y los ensayos se realizaban en juegos de tres piezas.

2.4 Pruebas de las unidades experimentales

Para determinar el coeficiente de conductividad térmica de un material se utilizan principalmente dos técnicas: el método del hilo caliente y el de la placa caliente aislada. El primero se emplea principalmente para caracterizar fluidos simples y complejos, mientras que la segunda se utiliza en materiales sólidos, motivo por el que se usó esta técnica en este trabajo de la cual se describen sus características y procedimiento en la NOM-018-ENER-2011 y la NMX-C-189-ONNCCE-2010 respectivamente.

Para la realización de la prueba de placa caliente aislada se utiliza un aparato conocido como “placa caliente con guarda”, el cual consiste en dos planchas, una caliente y otra fría, conectadas por un medidor de flujo de calor (Martínez & Lira, 2004)

La prueba se realizó en el instituto de materiales de la UNAM campus ciudad universitaria y consistió en colocar una placa del material a estudiar entre las planchas del aparato, aplicándole calor de manera constante por solo uno de los lados de la placa. El aparato registró el tiempo y energía que se necesitó para que el calor atravesara la placa del material y se registrara en la plancha fría (Figura 5). El cálculo del coeficiente de conductividad térmica se determinó con base a estos datos (Martínez & Lira, 2004)



Figura 5: Realización de la prueba de placa caliente aislada.

Por su parte, el ensayo de compresión se realizó siguiendo lo establecido por diversas normas tales como la NMX-C-083-ONNCCE-2004, ASTM C39/C39M-20 y la NMX-159-ONNCCE-2004.

Para realizar esta prueba, las probetas cilíndricas se ensayan a distintos días o edades, siendo probadas dentro de un aparato llamado: maquina universal de ensayos. Para lograr validez en los resultados obtenidos, según la NMX-C-083-ONNCCE-2004, se requiere efectuar la prueba en al menos dos muestras de la misma edad para cada uno de los días probados.

Los ensayos de compresión para este trabajo se realizaron en el laboratorio 4 de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la UNAM (Figura 6), empleando en ellos probetas de 10 x 20 cm y realizando la prueba a 7, 14 y 28 días con el fin de establecer a detalle cómo se desarrolló la resistencia en las mezclas.



Figura 6: Elaboración del ensayo de compresión.

Por este motivo, se ensayaron tres probetas en cada fecha y se elaboraron nueve probetas para cada una de las mezclas estudiadas. El cálculo de la resistencia a compresión se realizó utilizando la siguiente formula: (Rivera L., 2009)

$$F'c = P / A$$

Donde:

$F'c$ = Resistencia a la compresión de los cilindros en kg/cm^2

P = Carga máxima aplicada en kg

A = Área de la sección transversal de las probetas

3 Resultados obtenidos

3.2 Resultados de estudios preliminares

La caracterización de la granulometría de la arena de río riolítica que se utilizó en la elaboración de las probetas para las pruebas se describe en la tabla 4 y en la figura 7. Con esto se comprobó que el material cumplía con lo solicitado por la MT.2.02.002/19 de la SCT y la NMX-C-329-ONNCCE-2016.

Tabla 4: Granulometría de la arena usada en el experimento

No. De malla	Porcentaje retenido acumulado (%)	No. De Malla	Porcentaje retenido acumulado (%)
4	0.00	20	52.39
6	11.62	25	57.83
10	25.97	200	95.90
18	46.92		

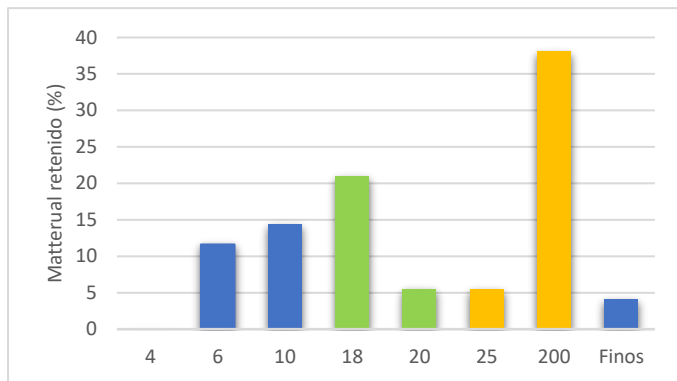


Figura 7: Comparativa del porcentaje de arena retenido por los distintos tamaños de malla

Respecto a la fibra de vidrio, se hicieron ensayos con mezclas de morteros que a las que se les agregaron distintos porcentajes de este material, obteniendo que 5% con respecto al volumen de la mezcla, era la cantidad máxima que se podía incluir en la mezcla, ya que a partir del 7% se comenzaba a reducir la trabajabilidad de la misma (Tabla 5).

Tabla 5: Ensayos con diferentes porcentajes de fibra de vidrio tipo AR

Clave de la mezcla	Porcentaje de fibra de vidrio agregado (%)	Resultados en la manejabilidad
T0-1	3 - 4	Buena
T0-2	5	Buena
T0-3	6 - 7	Baja
T0-4	8	Muy baja

Por último, la resistencia a la compresión de la mezcla control a 28 días fue 215 kg/cm², cumpliendo así con el objetivo de 127 kg/cm², así como lo solicitado para los morteros tipo M (Tabla 1) y con la resistencia de 210 kg/cm², para la que fue diseñada.

3.3 Resultados del experimento factorial

Los resultados obtenidos por las siete mezclas estudiadas, junto con el error experimental calculado, aparecen en la tabla 6. En la figura 8 se aprecia que las unidades experimentales con

puzolanas tuvieron menores coeficientes de conductividad térmica que la mezcla control, disminuyendo dicho coeficiente ante el aumento del porcentaje de puzolanas en las mezclas.

Asimismo, en la figura 9 se muestra una comparativa visual de los resultados obtenidos por las mezclas elaboradas con diatomita, perlita y zeolita, siendo esta última, la que presentó un rendimiento ligeramente superior.

Tabla 6: Resultados de la prueba de placa caliente aislada.

Clave del mortero	Coefficiente de conducción térmica (λ) (W/m.K)	Porcentaje de reducción (%)
T0	0.765 ± 0.010	---
D25	0.648 ± 0.013	15.294
D50	0.557 ± 0.011	27.190
P25	0.640 ± 0.015	16.340
P50	0.507 ± 0.012	33.682
Z25	0.635 ± 0.010	16.950
Z50	0.479 ± 0.011	37.386

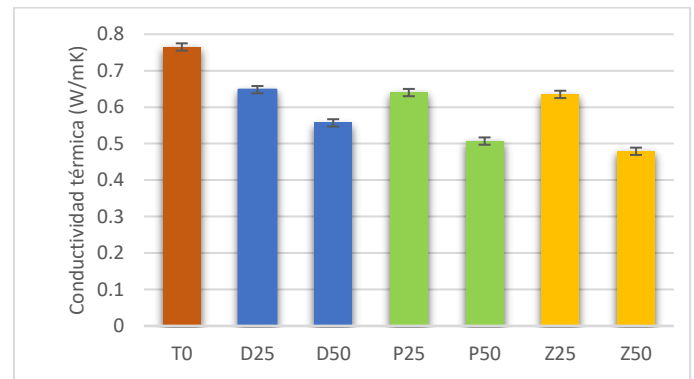


Figura 8: Comparativa de los resultados de coeficiente de conductividad térmica de los morteros estudiados.

Los datos arrojados por la prueba de placa caliente aislada mostraron que los morteros elaborados con el 25% de sustitución de arena por puzolanas, tuvieron resultados similares entre sí. Sin embargo, los resultados comenzaron a distanciarse con la proporción de 50%, siendo la mezcla Z50, en la que se sustituyó la mitad del volumen de la arena por zeolita, la que demostró una ligera superioridad sobre las demás, seguida por el mortero P50, elaborado con la misma proporción de perlita.

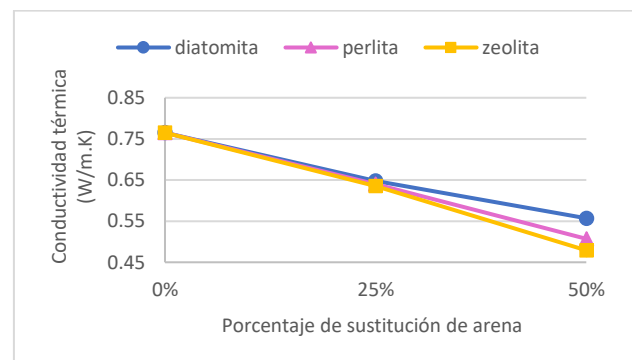


Figura 9: Comparativa de los comportamientos térmicos de la diatomita, perlita y zeolita dependiendo de su concentración en las unidades experimentales

En cuanto a los resultados de los ensayos de compresión, en la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos por las mezclas estudiadas a los 7, 14 y 28 días. Asimismo, en la figura 10 se aprecia una comparativa de dichos resultados, en los que sobresalió la baja resistencia mostrada por los morteros que fueron elaborados con perlita.

Tabla 7: Resultados de los ensayos de compresión de las unidades experimentales a 7, 14 y 28 días

Puzolana agregada	Clave del mortero	Edad de la muestra	F'c (kg/cm ²)
Ninguna	T0	7	133.31
		14	180.54
		28	215.18
Diatomita	D25	7	117.52
		14	161.25
		28	194.97
	D50	7	98.68
		14	138.25
		28	185.85
Perlita	P25	7	77.41
		14	110.78
		28	142.18
	P50	7	61.50
		14	72.79
		28	80.13
Zeolita	Z25	7	93.71
		14	165.38
		28	218.15
	Z50	7	68.25
		14	136.69
		28	197.31

Sin embargo, considerando que la resistencia más empleada en la industria de la construcción es la que se genera a los 28 días, se realizó un análisis más detallado de los resultados obtenidos en esta fecha, los cuales se muestran junto con el error experimental calculado, en la tabla 8.

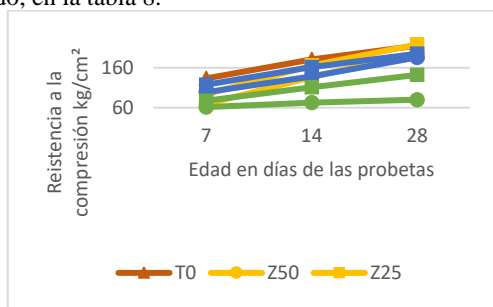


Figura 10: Comparativa de la resistencia a compresión de los morteros a 7, 14 y 28 días

Estos resultados también se ven reflejados en las figuras 11 y 12, ya que en la primera se cotejan los productos obtenidos por los morteros con puzolanas con respecto a la mezcla control, mientras que en la segunda se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos por los morteros elaborados con diatomita, perlita y zeolita; pudiéndose apreciar que los morteros que incluyeron zeolita en su composición, son los que tuvieron una resistencia con mayor similitud a la de la mezcla control.

Tabla 8: Resultados a detalle del ensayo de compresión de las unidades experimentales a los 28 días

Clave del mortero	Carga máxima aplicada (Ton)	F'c (kg/cm ²)	Porcentaje de reducción (%)
T0	16.90 ± 0.14	215.18 ± 1.81	---
D25	15.31 ± 0.06	194.97 ± 0.85	9.39
D50	14.60 ± 0.07	185.50 ± 0.94	13.63
P25	11.17 ± 0.13	142.18 ± 1.70	33.93
P50	6.29 ± 0.18	80.13 ± 2.32	62.76
Z25	17.14 ± 0.14	218.15 ± 1.78	+ 1.38
Z50	15.50 ± 0.17	197.31 ± 2.15	8.30

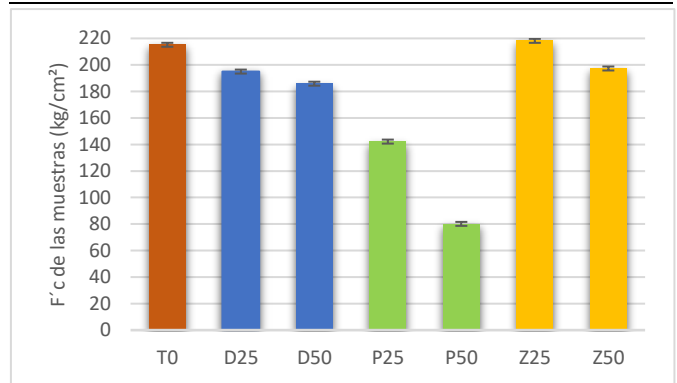


Figura 11: Comparativa de la resistencia a compresión de los morteros a los 28 días

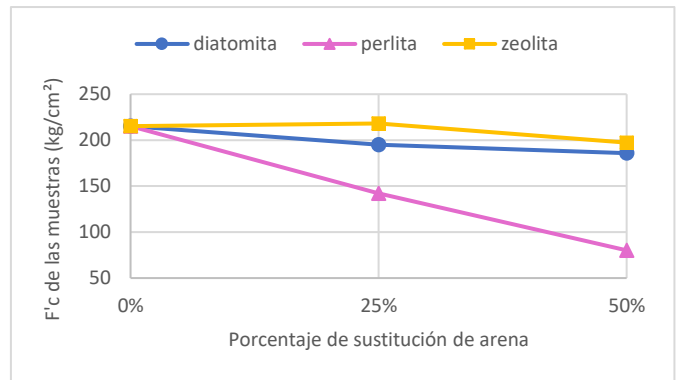


Figura 12: Comparativa de la resistencia a compresión de las unidades experimentales a los 28 días con respecto a la concentración de puzolanas dentro de los morteros

4 Análisis de los resultados

El error experimental calculado para los resultados obtenidos de la prueba de placa caliente aislada se mantuvo en un intervalo de ± 0.010 a ± 0.015, lo que define como aceptables a estos datos.

En cuanto a la tendencia observada en el comportamiento térmico de las mezclas estudiadas, se apreció que la presencia de puzolanas si redujo el coeficiente de conducción térmica de las unidades experimentales con respecto a la mezcla control. También se pudo observar lo siguiente:

- La puzolana que demostró reducir más la conductividad térmica del mortero fue la zeolita. Esto se pudo deber a la capacidad de *hidratación reversible* de la zeolita.
- La perlita mostró los segundos mejores resultados, siendo constante en la relación de reducción de coeficiente de

conductividad que produjo con respecto al aumento de la presencia de la perlita. Dicho resultado se pudo deber a su capacidad de retener agua en su superficie.

- La diatomita fue el material que generó la menor reducción del coeficiente de conducción térmica debido a que este material solo aportó un mayor porcentaje de porosidad a las mezclas. Además, los morteros elaborados con diatomita no mostraron una relación tan directa entre la mejora del comportamiento térmico con respecto al aumento de la puzolana, como se apreció en los elaborados con zeolita o perlita.

Sin embargo, sería recomendable realizar otras pruebas para establecer claramente los motivos por los cuales se presentaron dichos comportamientos dentro de los resultados obtenidos.

Por otro lado, respecto a la resistencia a compresión de los morteros estudiados, el intervalo de error experimental que se presentó en los datos fue de $\pm 2.32\%$ a $\pm 0.85\%$, lo que pudiera parecer elevado, sin embargo, el IMCYC y otros autores (Patiño & Méndez, 2010), (Taghaddos, Soleymani, & Robson, 2011) marcan que el intervalo aceptable para la variación de los resultados de los juegos de tres cilindros de medidas de 10 x 20 cm, es en promedio de hasta el 3.0%, por lo que los datos obtenidos de esta prueba se consideran aceptables.

Respecto a los resultados obtenidos por los morteros elaborados con puzolanas naturales, se apreció que las mezclas que incluían zeolita tuvieron resultados similares a los obtenidos por la mezcla control, teniendo el mortero Z25, una resistencia ligeramente superior a esta.

Estos resultados se debieron al efecto puzolánico que posee la zeolita, el cual contribuyó a aumentar la dureza de la mezcla a través de una mayor cementación de la pasta (Raggiotti, Positieri, Locati, Murra, & Marfil, 2015). Además, la capacidad de hidratación reversible de la zeolita, no afecta su estructura interna, lo que hace que su resistencia no se vea disminuida a pesar de adsorber agua del ambiente.

También debe mencionarse que estudios anteriores indicaron que la zeolita es un material lento para alcanzar su dureza (Andrada, y otros, 2012), lo cual se corroboró en este trabajo ya que los morteros elaborados con este material, si bien mostraron un aumento constante en su resistencia, tuvieron resistencia más baja a los 7 días que los morteros elaborados con diatomita, mientras que a los 14 días, tuvieron prácticamente la misma y a los 28 días los superaron.

La disminución en la resistencia a compresión de los morteros elaborados con diatomita se puede explicar por la mayor porosidad que la adición de este material causó dentro de sus mezclas, ya que muchos autores afirman que existe la relación de que, al aumentar la porosidad de un material, se tiende a disminuir su resistencia (Rivero Nogueiras, 2016).

En el caso de la perlita, la gran disminución de resistencia mostrada por los morteros en los que fue incluida puede explicarse por el hecho de que en este trabajo se utilizó *perlita expandida* y triturada, ya que la perlita pierde mucha resistencia tras su proceso de expansión. También podría deberse a la tendencia de la perlita de retener humedad en su superficie.

5 Conclusiones

Con base en todos los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- En el experimento, dentro de los morteros entre mayor fue el porcentaje de puzolanas incluidas en su mezcla, más grande fue la disminución que se produjo en su coeficiente de conductividad y su resistencia a la compresión.
- En el caso del comportamiento térmico de las mezclas estudiadas, tuvo mayor impacto en los resultados obtenidos la cantidad de puzolana agregada a la mezcla (25 o 50%), que el tipo (diatomita, perlita o zeolita).
- Los morteros elaborados con perlita mostraron un comportamiento térmico muy similar al de la zeolita, siendo ligeramente superior este último.
- La puzolana que generó la mayor disminución del coeficiente térmico de las mezclas fue la zeolita, logrando una reducción del 37% del mismo, cuando se sustituyó el 50% del volumen de la arena por este material.
- La diatomita fue la puzolana que generó menores reducciones en el coeficiente térmico de las mezclas, ya que, al contrario de la perlita y la zeolita, este material no posee una capacidad específica para retener humedad.
- El material que le aportó un mejor comportamiento mecánico a las mezclas fue la zeolita, ya que el mortero Z25 logró incluso, una resistencia ligeramente superior a la obtenida por la mezcla control, mientras que la Z50 solo mostró una disminución del 8% respecto a la misma y ambos morteros cumplieron con lo solicitado para morteros tipo M (tabla 1).
- La presencia de la perlita redujo mucho la resistencia a compresión de los morteros en los que fue incluida. Sin embargo, la muestra P25 cumplió con el rendimiento solicitado para los morteros tipo I o S, mientras que el P50, apenas y cumplió con lo requerido para los morteros tipo N, es decir, 76 kg/cm² (tabla 1). Por otro lado, también vale la pena mencionar que con la perlita se generaron las muestras de mortero más ligeras, por lo que este punto podría ser un tema a estudiar a fondo en futuros trabajos.
- Los morteros elaborados con diatomita cumplieron los 178 kg/cm² solicitados por las normas ASTM C-270 y ASTM C-780 para los concretos tipo M (tabla 1), siendo el segundo material con mejores resultados estructurales después de la zeolita.
- Considerando los resultados obtenidos en ambos estudios, se puede concluir que la puzolana que generó los mejores rendimientos en las unidades experimentales fue la zeolita, ya que mostró buenos resultados en las dos variables estudiadas. Por otro lado, los morteros elaborados con diatomita, si bien mostraron unas resistencias que cumplen por lo solicitado por las normas, fueron los de conductividad térmica más altas; mientras

que las mezclas que incluían perlita, tuvieron un comportamiento térmico similar a las que incluían zeolita, pero una significativa reducción de la resistencia a la compresión en comparación a las demás.

- Con respecto a la selección de la mezcla o unidad experimental con la mejor relación entre su comportamiento térmico y estructural, esta se realizó entre la mezcla Z25 o la Z50. Sin embargo, considerando que este trabajo se realizó con la finalidad de generar un material que pueda servir para la disminución del UHL, se seleccionó al mortero Z50 como aquel que cumplió con el objetivo propuesto para este trabajo.
- Como líneas de investigación futuras se recomienda establecer a detalle el tiempo de vida de las pastas cementantes con agregados de zeolita y la compatibilidad que tienen este tipo de mezclas con refuerzos tales como el acero.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de:

1. Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural.
2. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
3. Laboratorio cuatro de la Facultad de estudios Superiores Aragón UNAM

Referencias

- Águila Higuero, V. (2010). *Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida*. Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid.
- American Society of Testing Materials ASTM C-270-14a. Standard specification for mortar for unit masonry, ASTM International, West Conshohocken, PA”, Establece las resistencias mínimas para pruebas realizadas en el laboratorio, 2014.
- American Society of Testing Materials ASTM C-780-16a. Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry, ASTM International, West Conshohocken, PA. “Method of ensayo. Evaluación de morteros de pega para mampostería reforzada y no reforzada, antes y durante la construcción, 2016.
- Andrada, R., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A., Raggiotti, B., & Sánchez Soloaga, I. (2012). Evaluación térmica de morteros elaborados con zeolita como porcentaje de sustitución de aglomerante. *ASADES*, 16(08), 223-230.
- Borgel Espinoza, I. (2007). *Caracterización del yacimiento de Diatomita de Loma Larga, Municipio de Acatlán, Hidalgo; y evaluación de sus aplicaciones alternas*. Tesis que para obtener el título de Ingeniero minero-metalúrgico, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Materiales y Metalurgia, Pachuca, Hidalgo.
- Bosch, P., & Schifter. (1997). *La zeolita, una piedra que hierve*. Ciudad de México.
- Chacón Sánchez, V., & Astete García, J. (2015). *Estudio experimental del empleo de la diatomita en la producción de concreto con agregados de mina roja, Cunyac y Vicho*. Universidad Andina del Cusco. Cusco. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017
- Comino, P., & Romero, J. (julio/septiembre de 1996). El GRC Compuesto de matriz cementicia reforzado con Fibra de vidrio AR. *Materiales de construcción*, 79-89.
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2017). *Perfil de mercado de la Diatomita*. Secretaria de economía.
- Fideicomiso para el fomento minero. (1997). *Estudio de mercado de productos minerales, bloque No. 3. Perlita*. Reporte final de estudio de Mercado, Consultoría en optimización empresarial, S.A. de C.V., Pachuca.
- IMCYC. (Julio de 2011). *El concreto en la obra. Problemas, causas y soluciones*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Obtenido de: Propiedades del concreto.
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. (2006). Pruebas de concreto. En IMCYC, *Conceptos Básicos del Concreto* (págs. 18-21). Ciudad de México: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- Lorrio Domene, L. (2011). Análisis del comportamiento térmico de las zeolitas como material ligero, alternativo a la arcilla expandida, en hormigones para formación de pendientes. *Trabajo fin de Máster para Arquitecta Técnica*. (E. d. técnica, Ed.) Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez, V., & Lira, L. (2004). Caracterización de un aparato de placa caliente con guarda en desarrollo en el CENAM, para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos aislantes. *Simposio de Metrología*, (págs. 1-5).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (2017). *Determinación de la granulometría de la arena de sílice utilizada en la preparación de los morteros de cementantes hidráulicos, NMX-C-329-ONNCCE-2016*.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (2011). *Conductividad térmica por Aparato de Placa Caliente NMX-C-189-ONNCCE-2010*
- Patiño, O., & Méndez, R. (2010). Control de calidad del concreto (Normas, pruebas y cartas de control). *RICTEC*, 4(1 y 2), 59 - 64.
- Quintero Ortiz, L. A., Cruz Hernández, R. A., & Peña Santos, D. Y. (octubre-diciembre de 2014). Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto. (U. D. Caldas, Ed.) *Tecnura*, 18(42), 103-113.
- Raggiotti, B. B., Positieri, M. J., Locati, F., Murra, J., & Marfil, S. (2015). Zeolita, estudio de aptitud como una puzolana natural aplicada a hormigón estructural. *Revista de la construcción*, 14(2), 14-20.
- Rivera L., G. A. (2009). Resistencia del concreto. En G. A. Rivera L., *Concreto simple* (págs. 121-151). Cauca: Facultad de ingeniería civil de la Universidad de Cauca.
- Rivero Nogueiras, V. (2016). *Análisis Medio Ambiental de los aislamientos térmicos en la construcción*. Coruña: Universidad de Coruña.
- SCT. (2017). CMT. Características de los Materiales. En S. d. Transporte, *CMT. Características de los Materiales*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Secretaría de Gobierno. (2012). *Evaluación de la conductividad o resistencia térmica de los materiales aislantes NOM-018-ENER-2011*.
- Taghaddos, H., Soleymani, H., & Robson, J. (Marzo de 2011). Precisión de las pruebas de resistencia a compresión del concreto con especímenes cilíndricos de diferentes tamaños. *ACI*(2).
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (2003). *Pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, de la empresa Pastas Céricas Especializadas S.P.R*. Informe de laboratorio, Centro de investigaciones en materiales y metalurgia, Pachuca.
- Vera Barrios, B. S., & Ledezma Elizondo, M. T. (2018). Pasta cementicia mejorada con adición de Zeolita y Hierro en polvo para morteros de pega o junteo. *ingeniería, investigación y tecnología*, 19(2), 223-238.

