

Modificación del comportamiento del mortero con respecto a la humedad por adición de zeolita

Modification of the behavior of the mortar with respect to humidity by adding zeolite

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 compararon las características de un mortero generado sustituyendo el cincuenta por ciento de su volumen de arena por uno similar de zeolita con respecto a una mezcla control a la que no se le agregó zeolita. Esto con el objetivo de establecer si la presencia de dicho material modificaba el comportamiento del mortero con respecto a su humedad interna, así como establecer si la capacidad de absorción reversible de la zeolita seguía activa a pesar de encontrarse integrada dentro de una pasta cementante. Para lograrlo, a muestras de ambas mezclas se les hizo la prueba de absorción de humedad máxima inicial y la de absorción total a 24 horas, determinando también su humedad interna a lo largo del día para así establecer si se presentaban diferencias en ambos materiales, ante la humedad ambiental. Finalmente, los resultados obtenidos si demostraron claras diferencias en todas las pruebas realizadas a favor de la mezcla con zeolita, por lo que se concluyó que la hipótesis era correcta.

Palabras Clave:

Zeolita, Mortero, Absorción, humedad ambiental, Coeficiente de conducción térmica.

Abstract

In this article, the characteristics of a mortar generated by substituting fifty percent of its volume of sand for a similar one of zeolite were compared with respect to a control mixture to which no zeolite was added. This in order to establish whether the presence of said material modified the behavior of the mortar with respect to its internal humidity, as well as to establish whether the reversible absorption capacity of the zeolite was still active despite being integrated into a cementing paste. To achieve this, samples of both mixtures were subjected to the initial maximum moisture absorption test and the total absorption test at 24 hours, also determining their internal humidity throughout the day to establish whether there were differences in both materials, before environmental humidity. Finally, the results obtained did show clear differences in all the tests carried out in favor of the mixture with zeolite, so it was concluded that the hypothesis was correct.

Keywords:

Zeolite, Mortar, Absorption, ambient humidity, Thermal conduction coefficient.

1. Introducción

El problema de la Isla de Calor Urbana (UHI por sus siglas en inglés), es un fenómeno originado por muchos factores intrínsecos de las grandes ciudades del mundo y cuya principal consecuencia es el aumento de la temperatura al interior de las urbes, afectando así a todos los habitantes de las mismas. Uno de

los elementos más importantes que contribuyen a la creación del fenómeno de la isla de calor, es el extendido uso que tienen materiales como el mortero y el concreto en las edificaciones; los cuales son malos aislantes térmicos y tienen un alto coeficiente de conductividad térmica.

*Autor para la correspondencia: euniseflores30@gmail.com

Correo electrónico: euniseflores30@gmail.com (Eunise Sarai Flores Lozano), rocio.ideal@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)

Por ello, en la actualidad ya se han realizado muchas investigaciones con el objetivo de mejorar el funcionamiento térmico de las pastas cementantes. Un método para lograrlo es a través de la integración de puzolanas naturales dentro de las mezclas cementantes, ya que estos materiales contribuyen con la aglutinación de la pasta, son económicos, ecológicos y cuentan, además, con capacidades aislantes innatas (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018), (Chacón Sánchez & Astete García, 2015), (Borbón Almada, et al., 2018).

Dentro de estos trabajos, existe uno en el que se buscó generar un mortero aislante a través de la sustitución de un porcentaje del agregado fino de la mezcla por uno similar de diatomita, perlita o zeolita, estableciendo posteriormente su comportamiento físico y térmico a fin de determinar la mezcla con el mejor rendimiento (Flores Lozano, et al., 2020). Como resultado, se concluyó que el mortero que presentó las mejores características fue el que se elaboró sustituyendo la mitad del volumen del agregado fino por zeolita, ya que este cambio, redujo un tercio de su coeficiente de conducción térmica y tan solo el 8% de su resistencia a la compresión, con respecto a la mezcla control.

Para explicar este resultado, se teorizó que la zeolita utilizada en la creación del mortero, conservaba su capacidad de hidratación reversible, aun cuando la puzolana ya se encontrara integrada dentro del material, dotando así al mortero con facultades hidrofílicas (Raggiotti, et al., 2015), (Andrada, et al., 2012); término que la RAE define como material o sustancia que absorbe el agua con facilidad.

Para corroborar dicha hipótesis, se decidió realizar una serie de pruebas a fin de cotejar el comportamiento del mortero Z50 (clave con la que se nombrará al material estudiado de ahora en más) con una mezcla control sin zeolita (T0). Por ello, primero se realizó un seguimiento del proceso de fraguado de las muestras de ambas mezclas, y posteriormente, se les realizaron pruebas de absorción máxima inicial y absorción total a las 24 horas, así como un estudio de intemperismo avanzado. Por último, también se determinaron las variaciones que se presentaban en la humedad interna de las muestras a lo largo del día.

2. Metodología

2.1. Preliminares

2.1.1 Composición de la mezcla control

El objetivo del experimento que se describirá a continuación es comparar los resultados de la mezcla control T0 y la Z50, en las distintas pruebas previamente seleccionadas con el objetivo de determinar el comportamiento de ambos morteros con respecto a la humedad. Esto permitirá definir si se producen diferencias significativas entre el comportamiento de ambos materiales que permitan establecer si el mortero Z50 presenta o no características hidrofílicas similares a las de las zeolitas.

Por ello, resulta fundamental establecer primero la composición de los morteros que se compararan, y la cual se procuró sea igual a la utilizada en el estudio anterior (Flores Lozano, et al., 2020), ya que se pretende que este artículo sirva como complemento del mismo.

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

Con base en el uso que se le dará a un mortero, existen diversas proporciones con las que puede ser elaborado. Sin embargo, ya que se pretende utilizar el material Z50 como acabado arquitectónico, se decidió emplear la proporción cemento-arena 1:3 como cimiento del cemento de albañilería a fabricar, ya que es la más utilizada en México para elaborar morteros de este tipo.

En la norma N-CMT-2-01-004/02, emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se considera a los morteros generados con la proporción 1:3, como del tipo I y en la NMX-C-486-ONNCCE-2014, se establece que la resistencia promedio a compresión deseada para estos materiales se encuentra entre 125 y 180 kg/cm². Por otro lado, la norma ASTM C-270 y ASTM C-780 clasifica a los cementos de albañilería elaborados con esta proporción como tipo M y cuyas características y resistencias mínimas esperadas, aparecen en la tabla 1. Sin embargo, para fines de comparación, también se incluyeron en la misma la tabla, la información de los morteros tipo S y N.

En cuanto al agua, se utilizó la misma proporción que la empleada en el estudio previo (Flores Lozano et al., 2020); en el cual, para lograr que las morteros tuvieran una resistencia congruente con lo solicitado en las normas, y previendo que la presencia de la zeolita reduciría la resistencia a compresión del mortero Z50 (Raggiotti, et al., 2015), se decidió utilizar una proporción de agua-cemento de 1:0.70, en lugar de la recomendada de 1:0.95; ya que con base en lo establecido por la curva de Abrams (Figura 1), se esperaba que este cambio generara una resistencia a la compresión de $F'c$ 210 kg/cm² en la mezcla control.

Tabla 1: Composición y resistencia mínima esperada para los morteros generados con la proporción cemento- arena 1:3. Información extraída de la norma N-CMT-2-01-004/02, NMX-C-486-ONNCCE-2014, ASTM C-270 y ASTM C-780.

| Tipo | Partes de cemento Portland | Partes de arena | Resistencia mínima MPa (kg/cm ²) |
|------|----------------------------|-----------------|--|
| I | 1.0 | 2.5 – 3.0 | 12.5 (127) |
| M | 1.0 | 2.0 – 3.0 | 17.5 (178) |
| S | 1.0 | 3.5 – 4.5 | 12.5 (127) |
| N | 1.0 | 5.0 – 6.0 | 7.5 (76) |

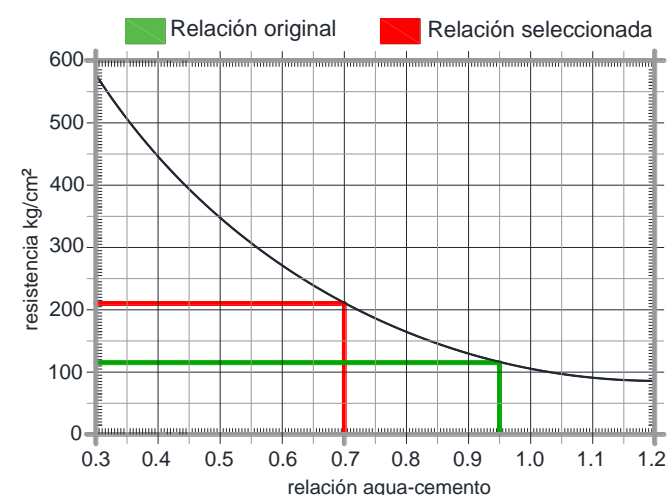


Figura 1: Relación agua cemento seleccionada para la mezcla control T0. Figura de elaboración propia.

Con respecto al agregado fino, se empleó arena de río del tipo riolítica de la cual se determinó su granulometría mediante tamices de un rango de malla de 4 a 0.2 mm y cuyos resultados se muestran en el apartado correspondiente.

Para terminar de igualar la mezcla de los morteros elaborados en este trabajo con los del estudio anterior, a la mezcla control se le agregó un refuerzo de fibra de vidrio del tipo AR. Material que incrementa el aislamiento térmico de los morteros, así como su resistencia a la tracción y flexión (Águila Higuero, 2010).

Con respecto a la cantidad de fibra de vidrio, se agregó la equivalente al 5% del volumen de la mezcla, porque es la máxima recomendada para que este material sirva como refuerzo en las pastas cementantes (Villamudria Rivera, 2014), ya entre mayor sea la cantidad de fibra de vidrio presente en la mezcla, menor será su trabajabilidad (Huamán Quispe, 2015); dato que se corroboró realizando mezclas previas de mortero en donde se utilizaron diferentes porcentajes de fibra de vidrio y cuyos resultados se aprecian en el apartado correspondiente.

En cuanto al método para distribuir la fibra de vidrio dentro de la mezcla, esto se hizo de forma azarosa y utilizando fibras de longitudes de 30 a 36 mm. Todo esto también fue similar a lo que se realizó en la fabricación de los morteros del trabajo anterior (Flores Lozano, et al., 2020).

Por último, el siguiente es el listado de los materiales que fueron usados dentro de 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

2.2. Composición del mortero Z50

El cemento de albañilería Z50 cuenta con las mismas proporciones de cemento, agua y fibra de vidrio que la mezcla control. La diferencia trascendental entre ambos materiales radica en que en el mortero Z50, la mitad del volumen de la arena de río fue sustituido por zeolita.

Las zeolitas son una familia de aluminosilicatos hidratados que cuentan con una estructura con micro poros que van de los 3 a los 10 angstroms (Bosch & Schifter, 1997). Las zeolitas tienen una alta resistencia a los sulfuros y tienen muchos usos en la industria, tales como catalizadores, desecantes o filtros moleculares.

Una de las características que distinguen a las zeolitas de otros materiales similares es 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). Este comportamiento es justamente el que se espera detectar en el mortero Z50, en caso de que nuestra hipótesis sea correcta.

En cuanto a la granulometría, dado que las zeolitas pueden ser sometidas a un proceso sencillo de molienda, se pueden adaptar a cualquier requerimiento; sin embargo, en el caso de este trabajo, se utilizaron las zeolitas en una granulometría similar a la que se estableció en la arena de río utilizada como agregado fino y que aparece detallada en el apartado de resultados.

Por otro lado, existen muchos tipos de zeolitas naturales, pero en este trabajo se utilizó clinoptilolita, ya que es el tipo de zeolita más abundante en nuestro país (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018). La clinoptilolita posee tres tipos de micro poros: uno mediano de 7.2 x 4.4 nm y dos pequeños de 5.5 x 4.0 nm y 4.7 y 4.1 nm respectivamente (López Romero, et al., 2010); Por último, la isoterma de adsorción previamente registrada para este material es del tipo mono molecular o de Langmuir (Figura 2), (Alvarado Ibarra, et al., 2020), (Aguilar Armenta & Patiño Iglesias, 2002).

Por último, en la tabla 2 se resume la constitución de las mezclas de ambos morteros.

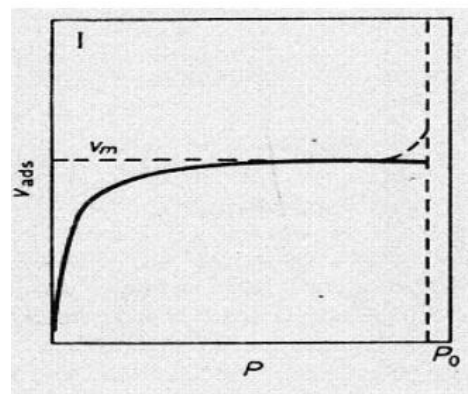


Figura 2: Isoterma de adsorción de la clinoptilolita. Imagen obtenida con fines didácticos de la página de la facultad de química de la UNAM.

Tabla 2: Composición en porcentaje de la mezcla control T0 y la Z50. Tabla de elaboración propia.

| Componentes | mezcla control T0 (%) | Mortero Z50 (%) |
|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Cemento | 0.248 | 0.248 |
| Arena | 0.747 | 0.3735 |
| Zeolita | --- | 0.3735 |
| Fibra de Vidrio | 0.005 | 0.005 |

2.3 Elaboración de unidades experimentales

Para la realización de las pruebas de este trabajo, se crearon dos tipos de probetas:

- Placas de 10 x 10 x 2 cm para las pruebas de absorción y muestreo de humedad.
- Placas de 7.5 x 15 x 1.5 cm, las cuales se usaron en la prueba de intemperismo.

Las piezas se elaboraron utilizando moldes de vidrio y madera hechos a la medida para cada una. El proceso para fabricarlas fue el mismo en ambos casos:

Primero se armaba el molde y con una brocha, se colocaba una capa de cera desmoldante en todas las áreas que estarían expuestas a la mezcla de mortero. Cuando se concluía este proceso, se realizaba el colado de la pieza en el molde, procurando, en la medida de lo posible, que no guardaran aire ni espacios vacíos en su interior, lo cual se lograba compactando la mezcla de manera constante con una varilla y dando golpes suaves con un mazo de goma en el perímetro de los moldes.



Figura 3: Elaboración de las muestras de 15 x 7.5 cm.

Una vez que se llenaba el molde (Figura 3), se cubría con una película plástica y se le dejaba reposar. El desmolde de la placa se

llevaba a cabo después de 24 horas y se colocaba posteriormente en agua saturada al 2% con cal para iniciar su proceso de curado.

Se iniciaban las pruebas en los especímenes a los 28 días, cuando concluían su curado (Figura 4); sin embargo, también se vigiló su proceso de fraguado, pesando diariamente las muestras a fin de establecer si se presentaban diferencias entre los dos morteros durante este periodo.



Figura 4: Muestras de 15 x 7.5 cm y de 10 x 10 cm utilizadas en este proyecto

Por último, debido a la cantidad reducida de agua que se utilizó en los morteros, la trabajabilidad de las mezclas se redujo y se tuvo un revenimiento de 3-4 cm en ambas mezclas. Asimismo, debido a la capacidad de adsorción de agua de la zeolita, la mezcla del mortero Z50 perdía humedad con mayor velocidad que la de control, por lo que era necesario trabajar lo más rápido posible con este material, a fin de no rehidratarlo de manera significativa.

2.4 Pruebas de las unidades experimentales

Para determinar las diferencias con respecto al manejo de la humedad en ambos morteros, se utilizaron las siguientes pruebas:

1. Mediciones a lo largo del día de la humedad interna de las muestras
2. Absorción máxima inicial
3. Absorción total a 24 horas
4. Prueba de intemperismo avanzado

Para la primera prueba se realizaron mediciones constantes a diferentes horas del día a las muestras de ambos morteros, utilizando para ello un medidor de humedad interna para pastas cementantes. Esto se realizó mientras los especímenes se encontraban expuestas al medio ambiente a fin de determinar si presentaban alguna diferencia en sus comportamientos.

Por otro lado, los procedimientos y características para realizar los ensayos de absorción de humedad se describen en las normas NMX-C-037-ONNCCE-2005 y NMX-C-037-1986. Estas pruebas se realizan en juegos de 5 muestras con medidas y composiciones similares, las cuales, antes de iniciar cualquiera de los dos ensayos debían ser sometidas a un proceso de secado hasta que alcanzaran un peso constante.

Dicho proceso consiste en que las muestras deben secarse en un horno a una temperatura de entre 100 y 110 °C, sacándolas periódicamente y dejándolas enfriar en un desecador antes de pesarlas, para luego nuevamente introducir las en el horno. Este procedimiento se repite hasta que, en dos pesadas sucesivas, la diferencia en peso no es mayor al 0.2% de la masa de las piezas.

Una vez completado todo el proceso de secado, las muestras se dejaban reposar por seis horas antes de iniciar las pruebas. Un dato

interesante es el hecho de las muestras elaboradas con la mezcla Z50, tardaban entre 4 y 5 horas más que las de la mezcla control en alcanzar su peso constante.

Por otro lado, la prueba de absorción máxima inicial se realiza en un recipiente rectangular en el que se colocan soportes hechos de barras de metal inoxidable de una altura aproximada de 6 mm y cuya sección transversal puede ser de distintas figuras, pero en nuestro caso, se usaron unos con forma semicircular (Figura 5).

Posteriormente, se llenaba el recipiente con agua potable hasta que el nivel del agua se encontrara de 3 a 3.5 mm arriba del nivel de los apoyos de metal. Luego, durante 10 minutos, se ponía en contacto con el agua una de las caras con acabado liso del espécimen analizado, contando el tiempo desde que la muestra tocaba el agua.



Figura 5: Prueba de absorción máxima inicial.

Pasado este tiempo, se retiraba la muestra, removiendo el exceso de agua con un paño húmedo antes de volver a pesarla, finalizando así la prueba. Para determinar el porcentaje de agua absorbido por las muestras, se utiliza la fórmula 1, la cual aparece en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005:

$$A = ((PI - P0) / P0) * 100$$

Donde:

A = Absorción en porcentaje (%)

$P0$ = Es la masa seca del espécimen en kg

PI = Masa saturada y superficialmente seca en kg

Pudiendo también con esta prueba, determinar la absorción máxima inicial en gramos/minutos; para lo que se utiliza la fórmula 2, extraída de la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005:

$$Cb = 100 M / S \sqrt{t} = 100 (PI - P0) / S \sqrt{t}$$

Donde:

Cb = Absorción máxima inicial en g/min

M = Es el peso del agua absorbido por la muestra durante la prueba, en gramos

S = Es la superficie de la cara sumergida en cm^2

t = Tiempo de inmersión en minutos

Con respecto al procedimiento para realizar la prueba de absorción total a las 24 horas, una vez que las muestras reposaron tras alcanzar su peso constante, se ata cada una con hilo plástico de poco diámetro y se cuelga de una horquilla, introduciendo después cada pieza en un recipiente en donde debe estar completamente cubierta de agua.

Lo primero que se debe hacer es registrar con una balanza, la masa del espécimen sumergido, cuidando que la pieza se

encuentre sin rosar las paredes ni el fondo del recipiente. Pasadas 24 horas, la pieza se extrae del recipiente y luego se seca superficialmente con un paño húmedo, antes de volver a registrar su peso, finalizando así esta prueba. Por último, los resultados de este ensayo se obtienen utilizando la fórmula 3, la cual fue obtenida de la norma NMX-C-037-1986:

$$A = ((M_{sss} - M_s) / (M_{sss} / Pa)) * 1000$$

Donde:

A = El volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3

M_s = Es la masa seca de la muestra en kg

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca en kg

Pa = Peso ahogado en kg

Por otro lado, para realizar la prueba de intemperismo, tres muestras de 15 x 7.5 cm de cada mortero, se introdujeron a una máquina de intemperismo acelerado por rayos ultravioleta (Accelerated weathering tester) Modelo LU-0819 (Figura 6), la cual se encuentra ubicada en el instituto de materiales de la UNAM en ciudad universitaria.



Figura 6: Máquina de intemperismo acelerado utilizada en este proyecto.

La máquina se programó para exponer a las muestras durante todo el día, a una longitud de onda de radiación UV que va de 295 nm a 800 nm, logrando así que por cada mes que la muestras permanezcan dentro de la máquina, estas reciban los efectos equivalentes más o menos a un año en la intemperie en la Ciudad de México. Esto para determinar si el tiempo de vida del mortero Z50 fue afectado por la presencia de la zeolita.

3 Resultados obtenidos

3.1 Resultados de estudios preliminares

La caracterización granulométrica de la arena de río riolítica que se utilizó como agregado fino en las mezclas comparadas, se puede apreciar en la tabla 3. Como ya se mencionó, con base en esta información se procuró que la zeolita tuviera una granulometría similar para que, al sustituir a la arena en la mezcla, no se presentaran cambios físico evidentes.

Tabla 3: Granulometría de la arena usada en las mezclas.

| 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 | | |

Con respecto a la realización de mezclas previas con diferentes porcentajes de fibra de vidrio para corroborar los efectos causados por la presencia de este material en la manejabilidad de las mismas, son los siguientes:

Tabla 4: 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 T0 a 28 días fue 215 kg/cm², cumpliendo así con lo solicitado para los morteros tipo I y M (Tabla 1) y con la resistencia de 210 kg/cm², para la que fue diseñada.

3.2 Resultados de la caracterización del fraguado

Las muestras de ambas mezclas fueron pesadas cada 24 horas para determinar si se presentaban diferencias entre los dos materiales durante este proceso, así como para calcular el peso volumétrico final de ambas mezclas, obteniendo así los datos que se aprecian en la Figura 7.

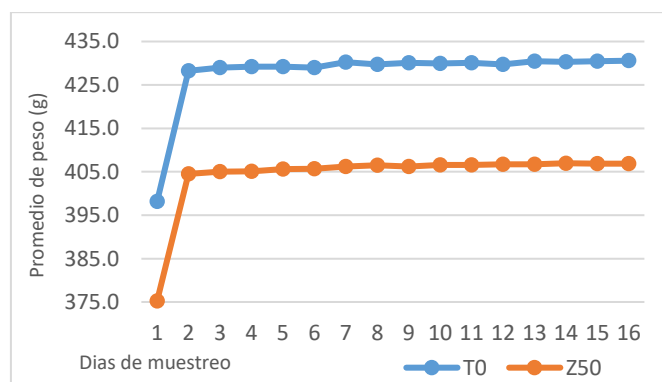


Figura 7: Comparativa del peso diario de las muestras de ambos morteros.

Se debe aclarar que los pesos que aparecen en la figura siete, fueron tomados mientras las muestras se encontraban en su proceso de curado; por ello, los especímenes se volvieron a pesar cuando se encontraban completamente secos, tras haberlos dejado secar únicamente a la intemperie y sin apoyo mecánico, obteniendo así los datos que aparecen en la tabla 5.

Tabla 5: Comparativa de los pesos saturados y secos de ambas mezclas.

| Mezcla | Peso final húmedo (g) | Peso seco (g) | Peso perdido (g) |
|--------|-----------------------|---------------|------------------|
| T0 | 438.9 | 409.6 | 29.3 |
| | 426.7 | 397.1 | 29.6 |
| | 432.7 | 403.9 | 28.8 |
| | 438.8 | 410.0 | 28.8 |
| | 428.8 | 401.3 | 27.5 |
| Z50 | 397.9 | 364.9 | 33.0 |
| | 399.5 | 366.3 | 33.2 |
| | 418.7 | 384.2 | 34.5 |
| | 413.0 | 374.7 | 38.3 |
| | 407.4 | 373.3 | 34.1 |

Con esto se pudo apreciar que una vez secas, las muestras de la mezcla control T0, perdieron en promedio un 6.6% de su peso

saturado mientras que la Z50 perdió un peso equivalente al 8.5%. Por último, con base en todo lo anterior, se calculó el peso por metro cubico de ambas mezclas, resultando lo siguiente:

$$T0 = 2020 \text{ kg/cm}^3 \quad Z50 = 1870 \text{ kg/cm}^3$$

3.3 Resultados de las pruebas de laboratorio

Con respecto a los muestreos que se hicieron a cada hora para determinar la humedad interna de ambas mezclas cuando se encontraban a la intemperie, los resultados son los que se aprecian en la Figura 8. Con esto se determinó que las muestras, si bien mostraron un comportamiento ligeramente similar durante el día, definitivamente si se registraron diferencias a favor de la mezcla Z50 debido a la presencia de la zeolita.

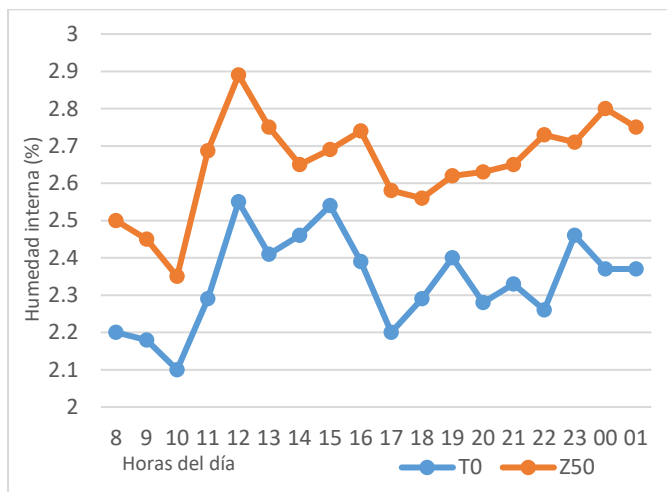


Figura 8: Resultados de la humedad interna que presentaron las muestras de ambos materiales a lo largo del día.

En cuanto a la prueba de absorción máxima inicial, los resultados que se obtuvieron utilizando la fórmula 1, son todos los que aparecen en la tabla 6. En ellos se aprecia que ambas mezclas tuvieron una diferencia de 3.5% en sus promedios de absorción a favor de la muestra con zeolita, lo que se observa mejor en la figura 9. Por último, la desviación estándar calculada para estos datos fue de 0.24 en la mezcla control y 0.28 en el material Z50.

Tabla 6: Resultados de la prueba de absorción máxima inicial.

| Peso seco (P0) (Kg) | Peso saturado (P1) (Kg) | Absorción (A) (%) | Promedio |
|---------------------|-------------------------|-------------------|----------|
| T0 | | | |
| 0.2498 | 0.2677 | 7.17 | 6.88 |
| 0.2717 | 0.2906 | 6.96 | |
| 0.2650 | 0.2822 | 6.49 | |
| 0.2810 | 0.3004 | 6.90 | |
| 0.2585 | 0.2763 | 6.89 | |
| Z50 | | | |
| 0.2482 | 0.2745 | 10.60 | 10.35 |
| 0.2598 | 0.2870 | 10.47 | |
| 0.2505 | 0.2769 | 10.54 | |
| 0.2795 | 0.3080 | 10.20 | |
| 0.1952 | 0.2146 | 9.94 | |

Por otro lado, los datos necesarios para calcular la cantidad de agua absorbida por minuto de cada muestra (usando para ello la fórmula 2), así como los productos obtenidos, son los que se aparecen en la tabla 7 y en la figura 10. La desviación estándar calculada para estos datos fue de 2.07 y 2.64 respectivamente.

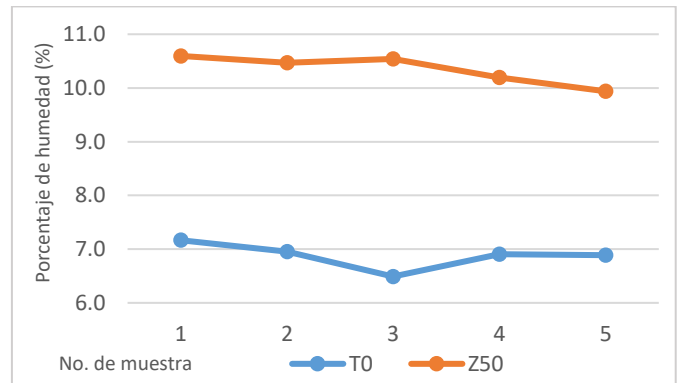


Figura 9: Porcentaje de la absorción máxima inicial de las mezclas analizadas.

Tabla 7: Resultados del cálculo de la absorción máxima inicial en g/min.

| Mezcla | Área muestra (S) (cm²) | Agua Absorbida (M) (g) | Cb (g/min) |
|--------|------------------------|------------------------|------------|
| T0 | 106.89 | 18.9 | 55.91 |
| | 108.03 | 19.1 | 55.91 |
| | 105.79 | 17.2 | 51.41 |
| | 108.39 | 20.4 | 59.52 |
| | 106.18 | 17.8 | 53.01 |
| Z50 | 106.54 | 25.3 | 75.10 |
| | 106.54 | 27.2 | 80.74 |
| | 106.92 | 24.4 | 72.17 |
| | 107.28 | 28.5 | 84.01 |
| | 78.66 | 18.9 | 75.98 |

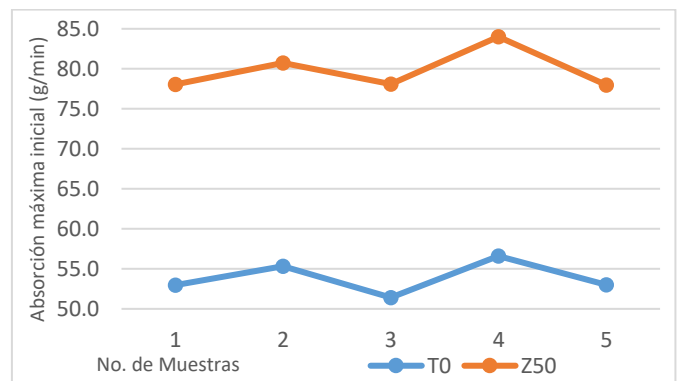


Figura 10: Comparativa de la velocidad de absorción máxima inicial.

Con respecto a los resultados a la prueba de absorción total a las 24 horas, son los que se aprecian en la tabla 8 y la figura 11. Estos datos se obtuvieron utilizando la fórmula 3, presentando, en el caso de la mezcla control, una desviación estándar de 1.028 y 0.918 en el de la mezcla Z50.

Por último, han transcurrido tres meses desde que se ingresaron las muestras de los dos morteros a la máquina de intemperismo acelerado. Sin embargo, hasta el momento ninguna de las muestras ha mostrado cambios físicos aparentes, como decoloración o desgaste en su perímetro. Por ello, se puede asumir que ambos morteros cuentan con al menos tres años de vida útil sin recibir daños significativos (Figura 12), aunque claro, sería necesario realizar estudios más profundos de los especímenes para corroborar que no presenten daños internos.

A futuro se planea seguir observando los cambios que se generen en las muestras con un mayor tiempo de exposición a la radiación ultravioleta, sin embargo, ya que en investigaciones previas se observó que las pastas cementantes con puzolanas ofrecen mayor resistencia a los sulfatos (Rodríguez Camacho, et.

al., 2000) y generan menor expansión álcali-agregado (IMCYC, 2013), se espera que el tiempo de vida de ambos materiales sea similar.

Tabla 8: Resultados de la absorción total a 24 horas de los morteros estudiados.

| Peso seco (Ms) (kg) | Peso bajo agua (Pa) (kg) | Peso saturado (Msss) (kg) | Agua absorbida (A) (dm ³ /m ³) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| T0 | | | |
| 0.3742 | 0.2000 | 0.4386 | 29.37 |
| 0.3504 | 0.2000 | 0.4158 | 31.46 |
| 0.3646 | 0.2020 | 0.4326 | 31.75 |
| 0.3635 | 0.2075 | 0.4295 | 31.89 |
| 0.3632 | 0.2025 | 0.4285 | 30.86 |
| Z50 | | | |
| 0.3136 | 0.1750 | 0.3981 | 37.15 |
| 0.3151 | 0.1750 | 0.3996 | 37.01 |
| 0.3333 | 0.1950 | 0.4173 | 39.25 |
| 0.3261 | 0.1770 | 0.4132 | 37.31 |
| 0.3193 | 0.1750 | 0.4074 | 37.84 |

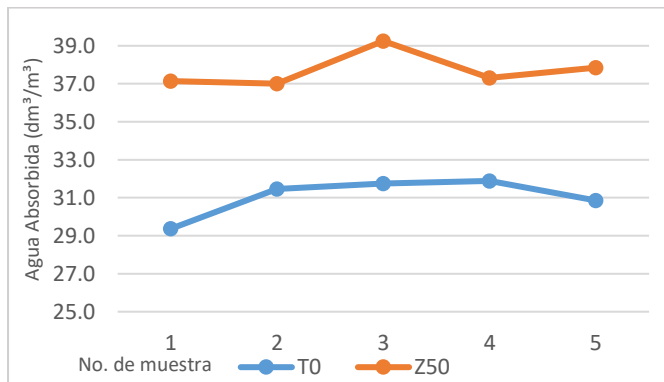


Figura 11: Resultados de la prueba de absorción total a 24 horas de los morteros estudiados.



Figura 12: Muestras de mortero Z50 en la máquina de intemperismo sin sufrir cambios.

4 Análisis de los resultados

Para iniciar el análisis de los resultados obtenidos, primero se debe mencionar que se presentaron diferencias en todos los resultados de las pruebas y por ello, se procederá a analizar la magnitud e impacto de estas discrepancias:

Con respecto al proceso de fraguado, resulta interesante que, si bien ambos materiales presentaron un comportamiento similar,

cuando las muestras de ambos materiales se encontraban saturadas de agua tras ser extraídas del proceso de curado, aunque todas perdieron peso, fue mayor el porcentaje de peso perdido por los especímenes del mortero Z50, lo que demuestra que este material puede retener y perder mayor cantidad humedad que la mezcla control, sin necesidad de recibir apoyo mecánico.

Asimismo, fue interesante que el cálculo de peso por metro cúbico de ambas muestras, presentó una diferencia del 7.4% a favor de la muestra Z50; lo que se puede ser causado por la estructura micro porosa de la zeolita, así como su densidad relativamente baja en comparación a materiales similares (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004).

Con respecto a las mediciones de humedad interna a distintas horas de los especímenes de ambos materiales, se decidió realizar el cálculo del coeficiente de determinación lineal para estos resultados, elaborando así la gráfica de la figura 13.

Se utilizó este método de análisis ya que se consideró que era el más adecuado para determinar la correlación que existen entre las variables, pero para realizarlo es necesario considerar los resultados obtenidos por ambos materiales.

De este modo, se determinó que las variables medidas en esa prueba, es decir, la presencia de zeolita y la humedad interna del material, tienen una correlación positiva de 0.611, lo que se clasificaría como una relación media (CIMEC, 2018); pudiendo entonces afirmar, con base en este resultado, que la presencia de zeolita si genera mayor humedad al interior del material Z50 con respecto a otro sin la presencia de este mineral.

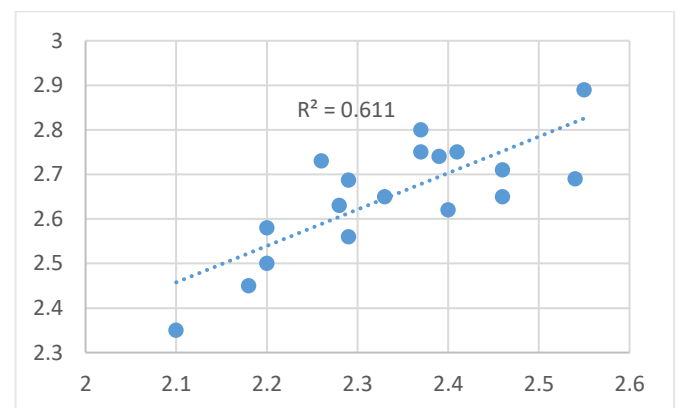


Figura 13: Gráfica para el cálculo del coeficiente de determinación lineal de los resultados obtenidos en el muestreo de humedad interna de ambas mezclas estudiadas.

Por otro lado, en la prueba de absorción máxima inicial, aunque los resultados del mortero Z50 fueron en promedio 3.5% superiores a los de la mezcla control, lo realmente significativo fue que, en el cálculo de la cantidad de agua absorbida en minutos de ambos materiales, se presentó una fuerte diferencia a favor de la mezcla Z50; siendo los resultados de este material casi equivalentes a 1.5 de los generados por el mortero T0. Este comportamiento es similar al de las zeolitas en su estado natural, ya que, al ser expuestos a agua, estos minerales tienden a adsorber agua rápidamente hasta saturarse (Bosch & Schifter, 1997).

Con respecto a los resultados de la prueba de absorción total a 24 horas, se determinó que las muestras del material Z50 absorbieron casi un 9% más de agua que los especímenes de la mezcla T0, lo que demostró que el mortero Z50 posee mayor capacidad para almacenar agua, coincidiendo con lo observado cuando las muestras concluyeron su proceso de curado.

Por último, habiendo transcurrido tres meses desde el inicio de la prueba de intemperismo, y dado que ninguna de las muestras

ingresadas en la máquina de intemperismo acelerado, ha sufrido cambios de coloración o desgaste en su perímetro, se puede asumir que ambos materiales tienen un tiempo de vida útil de al menos tres años.

5 Conclusiones

Si a todos los resultados conseguidos y analizados en este escrito, se le suman los datos obtenidos en el trabajo anterior en el que se basó este artículo (Flores Lozano y otros, 2020), entonces se puede asumir que la reducción del 37.38% del coeficiente de conducción térmica que se determinó que posee el mortero Z50 con respecto a la mezcla control, es generada por los porcentajes de adsorción y humedad interna de este material.

Por otro lado, si se resumen los datos obtenidos en este estudio, se puede inferir que el mortero Z50 cuenta con las siguientes características:

- Según los resultados de los muestreos a distintas horas de la humedad interna de los morteros, se pudo apreciar que el material Z50 adquiere y pierde humedad a distintas horas del día, al igual que la mezcla control; sin embargo, las muestras del mortero Z50 siempre tuvieron mayor humedad interna que las otras.
- Con base en los resultados de las dos pruebas de absorción, se puede asumir que cuando el mortero Z50 es expuesto al agua, tiende a adsorberla rápidamente, aunque este proceso se ralentiza conforme el material comienza a saturarse.
- Por la desigualdad de los tiempos necesarios para lograr que los especímenes de ambos materiales alcanzaran un peso constante, así como por las diferencias de peso que se registraron cuando las muestras de los dos morteros se encontraban saturadas de agua, se puede asumir que la mezcla Z50, tiene la capacidad almacenar mayor cantidad de humedad que la mezcla control.
- La pérdida de mayor cantidad de agua por parte las muestras del mortero Z50, que se registró tras la finalización de su proceso de curado, indica que el material tiene la capacidad de liberar mayor cantidad de humedad que el mortero T0, sin necesidad de recibir apoyo mecánico para lograrlo.
- La presencia de zeolita no ha evitado que el material Z50, cuente con al menos tres años de vida útil.

Estos comportamientos coinciden con los que se han descrito previamente que poseen las zeolitas (Bosch & Schifter, 1997); Por ello, se puede asumir que efectivamente, el mortero Z50 presenta capacidades hidrofílicas similares a las de las zeolitas, comprobando así nuestra hipótesis.

Sin embargo, sería conveniente realizar un microanálisis químico del mortero Z50, con el objetivo de estudiar su estructura a detalle y determinar si, a través de ella, se puede entender mejor el comportamiento hidrofílico de este material.

Por último, a futuro se recomienda estudiar la interacción del mortero Z50 con otros materiales constructivos, a fin de determinar cuáles serían los efectos de utilizarlo como material de acabado en las construcciones.

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.
- Aguilar Armenta, G., & Patiño Iglesias, M. E. (Noviembre de 2002). influencia del intercambio Ionico de clinoptilolita natural en la cinética de adsorción de CO₂, N₂ y CH₄ a 20°C. *Revista de la sociedad química de México*, 46(4), 324-329.
- Alvarado Ibarra, J., Terán Samaniego, K., Vargas Hernández, D., & Bautista Olivas, A. (29 de Julio de 2020). Clinoptilolita natural mexicana tratada con plata para remover DDD en agua. *Bioteconia*, XXII(3), 146-155.
- 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.
- Borbón Almada, A., Burgos Flores, D., Castro Brockman, S., Duarte Gaxiola, A., & Quintana Pacheco, J. (2018). Análisis Termofísico de morteros cemento arena 1:4 para construcción, sustituyendo arena por perlita sintética. (U. d. Sonora, Ed.) *EPISTEMUS*, 46-52.
- Bosch, P., & Schifter. (1997). *La zeolita, una piedra que hierve*. Ciudad de México.
- Centro de Investigación Regional del pacifico Sur. (2004). *Zeolitas de Oaxaca: Características mineralógicas y morfológicas*. Oaxaca: SAGARPA, Inifap
- 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: Universidad Andina del Cusco. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017
- Edificación, O. N. (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*.
- Flores Lozano, E., López de Juambelz, I., Velázquez Vázquez, D., Moreno Pérez, E., & Hernández Ávila, J. (12 de Diciembre de 2020). Comparativa del Impacto de la diatomita, perlita y zeolita en el comportamiento térmico y estructural del mortero. *Pädi*, 8(Especial), 5-13.
- Huamán Quispe, A. (2015). *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de vidrio*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería.
- IMCYC. (24 de Octubre de 2013). Puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado. *Construcción y Tecnología en concreto*.
- López Romero, M., Hernández Esponisa, M., Barahona Argueta, C., Martínez Guerrero, M., Portillo Reyes, R., & Rojas González, F. (marzo de 2010). Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. *terra Latinoamerica*, 247-254.
- 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.
- 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.
- Rodríguez Camacho, R., Dámazo Juárez, D., & Uribe Afif, R. (Julio de 2000). Los cementos puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos. (A. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Ed.) *Construcción y tecnología*. Obtenido de <https://www.imcyc.com/revista/2000/julio2000/pusolanicos3.htm>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2017). CMT. Características de los Materiales. En S. d. Transporte, *CMT. Características de los Materiales*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- 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.
- Villamudria Rivera, S. (2014). *Modificación de las propiedades del hormigón al ser reforzado con fibra de vidrio AR*. Máster en Ciencia y tecnología de Materiales, Universidad de Oviedo.

