

La zeolita como mineral asociado al cemento en morteros

Ernesto Patricio Feijoo Calle
<https://orcid.org/0000-0001-6901-7933>
pfeijoo@uazuay.edu.ec
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador

Bernardo Andrés Feijoo Guevara
<https://orcid.org/0000-0002-1089-1332>
bernardofejoo@uazuay.edu.ec
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador

Pablo Enrique Vásquez Álvarez
<https://orcid.org/0009-0008-4523-4739>
vazquez199@es.uazuay.edu.ec
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador

Recibido (24/08/2023), Aceptado (08/11/2023)

Resumen: La explotación de minerales en la actualidad está generando preocupación entre los ingenieros, debido a la posibilidad de escasos de estos recursos en el futuro; yacimientos de caliza cada vez van siendo agotados y se dificulta el descubrimiento de nuevos depósitos. Es indispensable, en este tiempo, buscar alternativas y sustitución de minerales en la industria, y para el caso del cemento podría adoptarse el uso de zeolita, la cual se presenta en la naturaleza en grandes cantidades y en muchas zonas geográficas. Este trabajo propone evaluar la resistencia a compresión simple (RCS) de probetas elaboradas con cemento y otras con una adición en partes iguales de zeolita, es decir 50 % de cemento y 50 % de zeolita, y así determinar la variación de valores de RCS. Los resultados son claros y se pudo generar conclusiones que deben tomarse en consideración por los profesionales involucrados en el uso del cemento.

Palabras clave: cemento, mortero, resistencia, zeolita.

Zeolite as an associated mineral in concrete

Abstract.- The exploitation of minerals today is generating concern among engineers, due to the possibility of shortages of these resources in the future; Limestone deposits are increasingly being depleted and the discovery of new deposits is becoming difficult. It is essential, at this time, to look for alternatives and replacement of minerals in the industry, and in the case of cement, the use of zeolite could be adopted, which occurs in nature in large quantities and in many geographical areas. This work proposes to evaluate the simple compressive strength (RCS) of specimens made with cement and others with an addition in equal parts of zeolite, that is, 50% of cement and 50% of zeolite, and thus determine the variation of RCS values. The results are clear and conclusions could be generated that should be taken into consideration by professionals involved in the use of cement.

Keywords: cement, mortar, resistance, zeolite.

I. INTRODUCCIÓN

La optimización del uso de minerales está generando que se produzcan investigaciones aplicadas para el consumo racional de los mismos, y debido a las cantidades usadas de ciertos minerales, estas investigaciones podrían ayudar a optimizar el consumo de otros con menores reservas. El desarrollo de la sociedad moderna demanda grandes volúmenes de recursos naturales, razón por la cual el hombre se impone la necesidad de buscar nuevas alternativas para proteger y preservar el medio ambiente. Uno de los mayores consumidores de recursos naturales, a nivel mundial, es el sector de la construcción, que utiliza grandes volúmenes de áridos en la elaboración de morteros y hormigones [1].

En los últimos años, la demanda de proyectos de infraestructura y construcción ha crecido rápidamente, lo que ha despertado mayor interés por la búsqueda de un diseño más eficiente, económicamente rentable y óptimo en lo que refiere a la mezcla de hormigón. Sin embargo, así como ha crecido la demanda de proyectos, han crecido los problemas al momento de la construcción, la innovación en los materiales utilizados y los impactos que estos ocasionan [2].

El hormigón es un material compuesto principalmente de cemento, áridos, agua y aditivos. Debido a que es un material heterogéneo, existen muchos factores que afectan la resistencia de los ensayos a compresión. Estos factores van desde la elección de las materias primas, hasta las condiciones de confección, curado y el mismo ensayo de las probetas de hormigón que se confeccionan en obra. A partir de esto, se determinan dos fuentes de variaciones en las resistencias del hormigón: variaciones en las propiedades del hormigón y variaciones debidas a las discrepancias en el proceso de ensayo [3]. El estudio de materiales es muy útil para conocer también el comportamiento de la energía involucrada en el proceso. Con la extracción de materias primas la energía se desperdicia en grandes cantidades y a esto, hay que sumar el uso de energía una vez que el edificio ya está construido, esta es la razón por la que es necesario conocer ciertos materiales [4]. El hormigón puede presentar una gran variedad de propiedades mecánicas y de duración buscando cumplir con las diferentes estructuras para los que fueron diseñados. La resistencia a la compresión del hormigón es la más utilizada en la industria de la construcción para diseñar las diferentes estructuras [5].

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros, tal como en las ocurrencias hidro-termales, o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas [6]. Gayoso y Gil en 1994 comenzaron los estudios de utilización de la zeolita como árido ligero en hormigones, con resultados empíricos satisfactorios. La construcción de cinco barcos de 8, 13 y 16 m de eslora bajo la concepción de obtener un aligeramiento en el hormigón fue logrado, obteniendo un peso volumétrico del hormigón 1850 kg/m³ [7]. Pero el estudio en el tiempo de estos hormigones evidenció un incremento sustancial de su resistencia, atribuyéndose este fenómeno a la reacción puzolánica ocurrida entre el mineral zeolítico (árido ligero) y los productos de hidratación del cemento. La caracterización de los materiales utilizados para la obtención de estos hormigones, el cálculo de su dosificación por medio de un software diseñado a tal efecto, la demostración de la reacción puzolánica de la zeolita y los resultados de resistencia obtenidos comparativamente con hormigones sin adición de zeolita, son presentados en el siguiente trabajo. Las zeolitas naturales del tipo clinoptilolita han demostrado eficacia en la sustitución del cemento como es el caso Sedlmajer que en su investigación concluyeron que la zeolita natural (clinoptilolita) puede ser sustituida parcialmente en el concreto ya que menores cantidades de reemplazo pueden alcanzar propiedades similares al cemento portland, aportando beneficios ecológicos y económicos [8].

Los resultados experimentales en cementos de clinker portland con porcentajes de zeolita del 10, 20 y 40% muestran que la sustitución parcial de clinker por zeolita natural permite la preparación de cementos con adiciones con propiedades mejoradas respecto a otros fabricados a partir de residuos industriales [9]. La

sustitución consiste en reemplazar determinada cantidad de cemento portland por un material cuyas características proporcionen productos similares a los que se obtiene al emplear cemento, con la finalidad de reducir los niveles de uso de este material sin que estas variaciones perjudiquen, sino que ayuden o conserven las propiedades del producto final en este caso el hormigón[10].

El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el clínker, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento. A diferencia del yeso, raras veces se utiliza el cemento solo, amasado con agua y formando una pasta pura. Su uso habitual es en combinación con otros materiales, especialmente con áridos para formar morteros y hormigón. Amasado con agua, el cemento fragua y endurece tanto en el aire como sumergido en agua. Se trata, por consiguiente, de un conglomerante hidráulico. El más conocido y el más utilizado de todos los cementos es el cemento portland [11]. El cemento es el ingrediente principal del concreto premezclado y la composición de este último es básicamente cemento, agregados y agua. Los agregados finos para hormigón de cemento estarán formados por arena natural, arena de trituración (polvo de piedra) o una mezcla de ambas. La arena deberá ser limpia, libre de materia orgánica, silícica (cuarzosa o granítica). Deberá estar constituida por granos duros, angulosos, ásperos al tacto, fuertes y libres de partículas blandas, materias orgánicas, esquistos o pizarras. La arena es considerada un árido. Los áridos naturales consisten en roca triturada, arena y grava. Desde el punto de vista de la cantidad y de su valor, los áridos son un material de construcción muy importante y proporcionan al hormigón su fuerza y su volumen, y el cemento une la mezcla dando una sustancia similar a una roca dura [12].

Luego de mezclar estos elementos se produce el denominado hormigón, el cual debe cumplir con el tiempo respectivo de fraguado o endurecimiento, para posteriormente ser sometido al ensayo de carga y así obtener su resistencia. La resistencia a la compresión surge del cociente entre la carga máxima del ensayo (carga de rotura por compresión) y la superficie transversal del elemento ensayado. Por lo tanto, para elementos fabricados de un mismo hormigón, sometidos a un mismo proceso de compactación y curado, las diferencias en el resultado del ensayo sólo deberían ser aleatorias, propias del proceso de producción [13].

II. DESARROLLO

El presente trabajo consistió en el planteamiento de sustituir parte del cemento utilizado en morteros con zeolita, con el fin de obtener una resistencia a la compresión similar a las probetas exclusivamente elaboradas con cemento. En teoría los morteros deben contener únicamente cemento, arena y agua, pero para reducir costos se plantea sustituir el cemento, pero no en términos totales. El cemento usado es del tipo comercial, usado en obras de infraestructura. La arena es procedente de río y fue sometida a un proceso de clasificación granulométrica. Finalmente, la zeolita es de uso comercial. Por otra parte, las probetas elaboradas, con las composiciones que se describirán en la metodología, se dejaron secar y luego fueron sometidas al ensayo de compresión. El ensayo a compresión se realizó sistemáticamente y se obtuvieron los valores respectivos.

A. La zeolita

La zeolita es un mineral microporoso perteneciente al grupo de los aluminosilicatos. Está compuesta principalmente por aluminio, silicio y oxígeno, y su estructura cristalina forma una red tridimensional de canales y cavidades que pueden contener agua y otros iones. Además, las zeolitas son conocidas por su capacidad única de intercambio iónico y adsorción. Debido a sus propiedades, se utilizan en una variedad de aplicaciones industriales y medioambientales, como:

Suavización del agua: Las zeolitas pueden intercambiar iones de calcio y magnesio en el agua por iones de sodio, ayudando a reducir la dureza del agua.

- *Adsorción de gases*: Se utilizan en sistemas de purificación de aire y gas para adsorber moléculas no deseadas, como compuestos orgánicos volátiles.
- *Catálisis*: Algunas zeolitas tienen propiedades catalíticas y se emplean en procesos químicos para acelerar reacciones específicas.
- *Absorción de metales pesados*: Las zeolitas pueden adsorber y retener metales pesados, contribuyendo a la remediación de aguas contaminadas.
- *Detergentes*: Se utilizan en la fabricación de detergentes debido a su capacidad para intercambiar iones y ayudar en la eliminación de impurezas.
- *Agricultura*: En la agricultura, las zeolitas pueden utilizarse como mejoradores de suelos, ayudando a retener agua y nutrientes para las plantas.

Es importante tener en cuenta que existen diferentes tipos de zeolitas, cada una con propiedades específicas. Su versatilidad y capacidad para realizar intercambios iónicos las convierten en materiales valiosos en diversas aplicaciones industriales y medioambientales. Este trabajo es una base teórica importante y el respectivo análisis propuso la elaboración de probetas de cemento más zeolita y permitió la variación de parámetros técnicos, dentro de los límites permitidos. En la parte metodológica se hace una explicación de esta variación. Los resultados obtenidos presentan un rango variable, pero aceptable, lo que nos demuestra la validez de la teoría. Las conclusiones evidencian lo expuesto anteriormente.

III. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este trabajo fue de carácter experimental y se describe a continuación.

Las probetas elaboradas tuvieron, además de arena y agua, exclusivamente cemento y una variación en la cantidad de este, complementado dicha diferencia con zeolita. El cemento utilizado fue del tipo GU, diseñado para todo tipo de construcción, el cual cumple los estándares de la norma NTE INEN 2380. La arena usada fue obtenida de río, y se clasificó entre las mallas 20 y 30. La zeolita usada es del tipo de zeolita clinoptilolita perteneciente al grupo de la heulandita.

El primer conjunto de probetas, el cual estuvo compuesto de tres subgrupos, C1, C2 y C3, tuvo la siguiente composición: Un primer subgrupo, denominado C1, en el que las cantidades usadas fueron 1750 g de cemento, 3500 g de arena y 980 cm³ de agua. Para el subgrupo C2, se utilizaron 1166 g de cemento, 3500 g de arena y 700 cm³ de agua, finalmente para el subgrupo C3, se utilizaron 875 g de cemento, 3500 g de arena y 560 cm³ de agua. En el segundo conjunto se involucró la zeolita, como complemento del cemento y se elaboraron tres subgrupos de probetas, el subgrupo Z1 con 875 g de cemento, 875 g de zeolita, 3500 g de arena y 980 cm³ de agua, por otra parte, el subgrupo Z2, estuvo compuesto por 583 g de cemento, 583 g de zeolita, 3500 g de arena y 700 cm³ de agua, finalmente el subgrupo Z3 estuvo formado con 437,5 g de cemento, 437,5 g de zeolita, 3500 g de arena y 560 cm³ de agua. Uno de los subgrupos de probetas mencionados se puede observar en la figura 1.

Cabe recalcar que todas las probetas tuvieron dimensiones aproximadas de 5 cm x 5 cm x 10 cm.



Figura 1. Probetas elaboradas.

Luego de la elaboración de los conjuntos de probetas, estas se dejaron secar a temperatura ambiente por 7 días para iniciar con el ensayo de ruptura y así determinar su resistencia. El equipo utilizado para la medición de la resistencia a la compresión simple (RCS), se puede observar en la figura 2. La máquina de ensayos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales, para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta (modelo de dimensiones preestablecidas) y mide en forma gráfica la deformación, y la carga al momento de su ruptura.



Figura 2. Máquina de compresión Humboldt.

IV. RESULTADOS

Luego de ejecutar los ensayos, se presentan los resultados en la tabla 1, con los diferentes valores de resistencia a la compresión de las probetas del primer conjunto, es decir de las que contienen exclusivamente cemento.

Tabla 1. Valores de RCS de las probetas con cemento.

Muestras C1	RCS (MPa)	Muestras C2	RCS (MPa)	Muestras C3	RCS (MPa)
1	9,04	11	4,27	21	1,22
2	10,15	12	4,35	22	1,23
3	10,19	13	4,61	23	1,57
4	10,76	14	4,79	24	1,60
5	10,82	15	4,93	25	2,11
6	10,82	16	5,43	26	2,34

En la tabla 2 se presentan los resultados de la RCS de las probetas del segundo conjunto, que contienen zeolita en su composición.

Tabla 2. Valores de RCS de las probetas con cemento y zeolita.

Muestras Z1	RCS (MPa)	Muestras Z2	RCS (MPa)	Muestras Z3	RCS (MPa)
31	1,47	41	1,31	51	1,11
32	1,82	42	1,36	52	1,23
33	1,84	43	1,38	53	1,27
34	1,88	44	1,41	54	1,44
35	1,93	45	1,47	55	1,46
36	2,27	46	1,67	56	1,55

En la tabla 3 se presentan los resultados de los valores de media, mediana y desviación estándar de los subgrupos de probetas de cemento.

Tabla 3. Valores de media, mediana y desviación estándar de las probetas con cemento.

	C1	C2	C3	
Media	10,30	4,73	1,68	MPa
Mediana	10,47	4,70	1,59	MPa
Desviación estándar	0,69	0,42	0,46	MPa

Finalmente, en la tabla 4 se presentan los resultados de los valores de media, mediana y desviación estándar de los subgrupos de probetas de cemento con adición de zeolita.

Tabla 4. Valores de media, mediana y desviación estándar de las probetas con cemento y zeolita.

	Z1	Z2	Z3	
Media	1,87	1,43	1,34	MPa
Mediana	1,86	1,39	1,36	MPa
Desviación estándar	0,26	0,13	0,17	MPa

Se puede observar que los resultados muestran una gran similitud entre los grupos de probetas C3 con las probetas del grupo Z1, lo que implica que, para conseguir resistencia de los cementos y morteros, dentro de esos límites, se puede utilizar la adición de zeolita.

CONCLUSIONES

Una vez evaluados los resultados se puede observar que al disminuir la cantidad de cemento en las probetas y complementar dichas cantidades con zeolita, la resistencia a la compresión disminuye, por lo que se debe tomar en consideración este efecto. Este fenómeno sugiere una relación inversa entre la cantidad de cemento y la resistencia a la compresión en las probetas con adición de zeolita. Si bien la disminución en la resistencia puede ser inicialmente desconcertante, abre la puerta a una reflexión más profunda sobre la interacción compleja entre los componentes de la mezcla. Podría indicar que, en ciertos casos, la zeolita actúa como un agente diluyente, alterando la estructura interna del material. Este descubrimiento no solo tiene implicaciones importantes para la formulación de mezclas de concreto, sino que también destaca la necesidad de una comprensión más completa de los efectos sinérgicos de los diversos ingredientes en la ingeniería de materiales. Investigaciones adicionales podrían revelar estrategias innovadoras para optimizar la relación entre cemento y zeolita, aprovechando al máximo las propiedades de ambos para lograr materiales más eficientes y sostenibles.

La metodología planteada nos permite observar que para las probetas elaboradas solo con cemento la resistencia a la compresión tiene valores entre 1,68 MPa y 10,3 MPa, en cambio para las probetas con adición de zeolita los valores están entre 1,34 MPa y 1,87 MPa. Esta notable diferencia en los rangos de resistencia a la compresión entre las probetas elaboradas solo con cemento y aquellas con adición de zeolita resalta el impacto significativo que puede tener la inclusión de este mineral microporoso en las propiedades mecánicas del material. La zeolita, con su estructura cristalina única y propiedades de absorción, parece influir de manera considerable en la resistencia final del compuesto.

Este hallazgo no solo abre puertas a posibles mejoras en la formulación de mezclas de concreto, sino que también sugiere la exploración de nuevas aplicaciones y tecnologías que podrían beneficiarse de las propiedades únicas de la zeolita en la ingeniería de materiales.

Se observó que la resistencia a la compresión de las probetas del grupo C3 y las del grupo Z1 mantienen una uniformidad, y dichos valores están en el orden de 1,59 MPa hasta 1,87 MPa, lo que se podría decir que son similares. La notable consistencia en los valores de resistencia a la compresión entre las probetas del grupo C3 (con menor cantidad de cemento) y las del grupo Z1 (con adición de zeolita) es un descubrimiento intrigante que merece una exploración detallada. Este patrón sugiere la posibilidad de que la zeolita, al actuar como un componente de la mezcla, pueda compensar la reducción de cemento, manteniendo la estabilidad y resistencia del material final. Este fenómeno podría estar relacionado con las propiedades específicas de la zeolita, como su capacidad para mejorar la cohesión y la durabilidad del concreto.

Este tipo de mortero, con sus propiedades particulares y baja resistencia, se presenta como una opción versátil para una variedad de aplicaciones en la construcción. Su idoneidad para mampostería de baja resistencia, bordillos, revestimiento de paredes y elementos ornamentales sugiere que podría desempeñar un papel valioso en proyectos donde la prioridad no sea exclusivamente la carga estructural, sino también la estética y la facilidad de manipulación durante la instalación. Sin embargo, es crucial que los profesionales de la construcción tomen decisiones informadas y consideren cuidadosamente las especificaciones de cada proyecto. La elección adecuada de este tipo de mortero dependerá de factores como la carga estructural requerida, las condiciones ambientales, los estándares de construcción locales y la durabilidad a largo plazo. La evaluación rigurosa de estos elementos asegurará que la composición del mortero seleccionada se ajuste de manera óptima a las necesidades específicas del proyecto, garantizando resultados duraderos y seguros.

La incorporación de zeolita en cementos tipo N o cementos plastificantes y morteros no solo presenta beneficios económicos, sino que también abre un área de investigación en relación con la durabilidad frente a las condiciones climáticas y la meteorización. Al considerar que todo cemento, mortero u hormigón constituye esencialmente una roca artificial, el estudio de cómo la zeolita puede influir en su resistencia a los efectos del intemperismo ofrece una perspectiva intrigante. La capacidad de la zeolita para absorber y liberar agua, así como su resistencia química, plantea la posibilidad de que su inclusión en las mezclas pueda conferir propiedades protectoras adicionales contra la corrosión y la degradación ambiental. Este enfoque no solo promete reducir el consumo de áridos, sino que también podría impulsar el desarrollo de materiales de construcción más resistentes y sostenibles, abriendo nuevas fronteras en la ingeniería de materiales para ambientes cambiantes.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Costafreda, B. Calvo, X.B. Peralta, "Aprovechamiento de los residuos de demolición de la ciudad de Madrid en morteros con zeolita natural: una contribución a la mejora del medio ambiente". III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 2009.
- [2] S. P. Muñoz, A. L. Cabrera, C. C. Delgado, P. A. Renilla, "Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 57-72, 2022. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022005>.
- [3] C. Torres, "Evaluación de la calidad del proceso de confección de hormigón premezclado mediante el análisis estadístico de resistencias a la compresión". 2019. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173709>.
- [4] J. Cárcel, A. Martínez, J. Llinares, J. Kaur, "Alternativas ecológicas de los materiales tradicionales en la construcción sostenible. 3C Tecnología". *Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 11(1), 17-29. 2022. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2022.v11n1e41.17-29>.
- [5] I. Saif, "Análisis comparativo entre ensayos destructivos y no destructivos de la resistencia del Hormigón con diferentes métodos de dosificación". 2019. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/17797>.

- [6] A. Curi, W. Granda, H. Lima, W. Sousa, "Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros". *Información tecnológica*, 17(6), 111-118. 2006.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>.
- [7] M. Rosell, R. Galloso, B. Calvo, "Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones". *Boletín Geológico y Minero*, 117(4), 783-792. 2006.
- [8] V. Salcedo, "Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland". 2021. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32000>
- [9] I. Janotka, S. Mojumdar, "Hidratación y resistencia al ataque por sulfatos de cementos portland y cementos con zeolita natural" *Rev. Materiales de Construcción*, vol. 53, no. 269, pp. 17-27, 2003.
- [10] Y. Valenzuela, "Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón al emplear zeolita natural en reemplazo parcial del cemento". 2017. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25828>.
- [11] M. Sanjuán, S. ChinChón, "Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland". Universidad de Alicante. 2014.
- [12] E. Tarbuck, F. Lutgens, "Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física". España: Pearson Educación S. A. 2005.
- [13] P. Vila, M. Pereyra, A. Gutiérrez, "Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón. Resultados tendientes a validar el ensayo en medio adoquín". *Revista ALCONPAT*, 7(3), 247-261. 2017. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.186>

LOS AUTORES



Patricio Feijoo Calle, Ingeniero en Minas, egresado de la Universidad del Azuay (Cuenca-Ecuador), con estudios y pasantías en: Bolivia, Brasil, España, Australia en áreas de geología, geofísica y desarrollo de actividades mineras. Está vinculado a la docencia e investigación en la Universidad del Azuay desde 1991.



Bernardo Feijoo Guevara, Ingeniero Civil, por la Universidad del Azuay (Cuenca-Ecuador), con estudios y pasantías en: Colombia, Perú, Cuba y Panamá, en áreas de caracterización de materiales y procesos de elaboración de cementos y hormigones. Está vinculado a la docencia e investigación en la Universidad del Azuay.



Pablo Vásquez Álvarez, Ingeniero en Minas, egresado de la Universidad del Azuay en 2023 (Cuenca-Ecuador). Participante en proyectos de investigación y vinculación de la Escuela de Ingeniería en Minas.