

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. CONSTRUCCIONES

**LA ZEOLITA NATURAL COMO ALTERNATIVA EN LA
PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

Autor: Manuel Alejandro Huerta Sánchez

Holguín 2022

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. CONSTRUCCIONES

**LA ZEOLITA NATURAL COMO ALTERNATIVA EN LA
PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN

AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Autor: Manuel Alejandro Huerta Sánchez

Tutora: DrC. María Onelia Urbina Reynaldo (PT)

Holguín 2022

PENSAMIENTO

*La ingeniería continuará siempre transformando
y mejorando a la sociedad.*

Carlos Slim Helú

DEDICATORIA

Porque son el sostén de mi vida, porque mi propósito es su bienestar, dedico este primer paso a mi familia.

También a todas aquellas personas que hicieron posible una de mis metas.

AGRADECIMIENTO

Muchas gracias a mi profesora y tutora Dr.C. María Onelia Urbina Reynaldo por su paciencia, conocimiento y tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo de diploma.

Al colectivo de profesores que me han ayudado a llegar hasta aquí y a mis amigos y compañeros de clase que sin ellos no hubiera sido posible.

A mi familia por su apoyo y confianza.

A todos los que de una u otra manera han contribuido en la realización de este trabajo.

Muchas Gracias.

RESUMEN

Minimizar las afectaciones medioambientales y económicas que traen consigo el desarrollo constructivo de una región es una tarea que debe ser ejecutada con rigurosidad. En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación de las características de hormigones con agregados de zeolita sustituyendo parcialmente al cemento, con el objetivo de analizar la posibilidad de su uso en la provincia de Holguín por los beneficios económicos y ecológicos que brindan. Su empleo en hormigones puede significar desde un 10 hasta un 30% de ahorro de cemento según las experiencias analizadas y una reducción equivalente de emisiones de gases a la atmósfera en elaboraciones de clínquer. En la presente investigación se evalúa el comportamiento de la zeolita natural como agregado para la producción de bloques huecos de hormigón a partir de sus potencialidades físicas y mecánicas, que permita su aprovechamiento en la industria de la construcción en la provincia de Holguín. Para su desarrollo se aplicaron métodos de investigación del nivel teórico, empírico y estadístico, que permitieron constatar las insuficiencias y valorar la factibilidad de los aportes de la investigación. Igualmente, el asiento bibliográfico se desarrolló a partir de las normas APA.

ABSTRACT

Minimizing the environmental and economic effects that the constructive development of a region brings with it is a task that must be carried out rigorously. In the present work the results of the evaluation of the characteristics of concretes with zeolite aggregates partially substituting the cement are shown, with the objective of analyzing the possibility of its use in the province of Holguín due to the economic and ecological benefits they provide. The use of zeolite in concrete can mean up to 10% to 30% savings in cement according to the experiences analyzed and an equivalent reduction in gas emissions into the atmosphere in clinker production. In the present investigation, the behavior of natural zeolite is evaluated as an aggregate for the production of hollow concrete blocks from its physical and mechanical potentialities, which allows its use in the construction industry in the province of Holguín. For its development, research methods of the theoretical, empirical and statistical level were applied, which allowed verifying the insufficiencies and assessing the feasibility of the research contributions. Likewise, the bibliographic entry was developed from the APA standards.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DEL USO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
I.1 La zeolita natural. Generalidades y ciclo de vida	8
I.1.1 Propiedades físico-mecánicas de la zeolita natural	10
I.1.2 Ventajas y desventajas	12
I.2 La producción de materiales de construcción con zeolita natural	14
I.3 Experiencias del uso de zeolita natural como material de construcción	15
I.3.1 Experiencias en Cuba	25
I.3.2 Experiencias en Holguín	28
Conclusiones parciales	32
CAPÍTULO II. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE USO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN HOLGUÍN	
II.1 Concepciones metodológicas para la propuesta de alternativas de uso de la zeolita natural como material de construcción	33
II.2 Potencialidades de la zeolita natural de Loma Blanca en San Andrés, Holguín	35
II.3 Propuesta de alternativas de uso de zeolita natural como material de construcción	
Conclusiones parciales	38
CONCLUSIONES GENERALES	49
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el sector de la construcción ha venido experimentando cambios debido a la utilización de nuevos materiales y a la implementación de otros que eran conocidos en la antigüedad. Tal es el caso de las puzolanas que conjuntamente con la cal eran utilizadas como material cementante para la construcción de estructuras de la civilización romana y griega, dando a conocer la efectividad de estos productos como parte de pastas y morteros cementicios. Diversas han sido las investigaciones sobre la actividad puzolánica que presenta la zeolita en los últimos años; en ellas se describe minuciosamente su comportamiento como puzolanas activas en base a las variaciones registradas en las propiedades mecánicas de los morteros elaborados (Costafreda, 2008).

Sin embargo, la utilización de zeolita para la elaboración de materiales aglomerantes es conocida desde la antigua civilización. Hoy en día su empleo en el hormigón no es común a pesar de que se reporta el uso generalizado de este material en la industria cementera en países como Grecia y Japón. Mientras que China, por su parte reporta el uso de más de 30 millones de toneladas por año de zeolita para la producción de cementos (Poon y Gayoso, 2006 y Rosell, 2004).

A decir de Gener (2001), los estudios de durabilidad de los hormigones con adiciones de zeolita han demostrado incrementos de resistencia y disminución de la permeabilidad. Esto se traduce en mayor impermeabilidad y disminución de absorción por capilaridad, en comparación con hormigones sin adiciones. Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos en otras investigaciones, la zeolita juega un papel muy importante en la fabricación de cementos con propiedades ventajosas, traducidas como mayor resistencia, menor calor de hidratación y mayor inhibición de la reacción álcalis-sílice. De esta forma, los cementos y hormigones que se pueden lograr con estas adiciones minerales son resistentes a los sulfatos y al agua de mar, lográndose una gran durabilidad de los mismos (Costafreda, et.al., 2007).

De esta manera se han llevado a cabo varias investigaciones sobre la aplicación de esta puzolana natural en la producción de cementos, hormigones y en la construcción de carreteras, acueducto y edificios. Según Corella (1988), se utilizó como elemento de sillería u ornamentales en la construcción del edificio asociado con las pirámides mayas del Monte Albán en el Sur de México, la estatua del Buda en Oya Japón, la cual fue excavada en solo estrato de una toba clinoptilólita.

Según Veranees (2005), en Palmarito de Cauto, Provincia Santiago de Cuba, se emplea el mineral en las producciones de losas de rocas zeolitizadas para la fabricación de piso, pared, escultóricos artísticos y otros artículos de usos con fines domésticos a partir de partes masivas del yacimiento. La investigación realizada por el Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de la Construcción de La Habana (2010), en los apuntes de las consideraciones sobre el uso de las zeolitas en la construcción plantea que la alta porosidad de este mineral, además de hacerlo ideal como árido o agregado ligero, favorece también este proceso pues la superficie activa o de reacción es mayor. No obstante diversos trabajos empíricos hacen suponer que los canales o poros al llenarse de gel cementicio hacen que esta partícula adquiera mayores resistencias que las propias del mineral, haciéndola un árido ligero de alta resistencia.

Otras investigaciones han demostrado el uso de adiciones de zeolita en tecnologías de prefabricado, premezclado y pretensado que han manifestado mejoras en las prestaciones. En el caso de Gayoso y Lam, (2010), manifiestan que las zeolitas naturales se utilizan en las proporciones de la mezcla de hormigón como árido normal para la fabricación de losas huecas pretensadas de hormigón. Por su parte Benítez (2011), parte del estudio de la zeolita de San Andrés, Holguín como fuente principal de materia prima en la elaboración de CP-40.

Este aglomerante hidráulico, producido a partir de mezclar íntimamente y moler hasta fino polvo, una combinación de hidrato de cal y puzolana, con una proporción promedio de 80% de puzolana y 20% de cal, alcanza baja resistencia mecánica, y su fraguado es más lento que el del cemento Portland. Dada sus características, puede ser

considerado como un cemento para aplicaciones de albañilería con resistencias por encima de los 2.4 MPa, que garantiza una disminución en el consumo de cemento en aproximadamente un 5%.

En ese mismo caso, Badía (2011), establece el diseño de dosificaciones para morteros, en las que se logra un mortero de albañilería utilizando como áridos solo la zeolita, con resistencias por encima de los 2.4 MPa. También, Valenzuela y Chérrez (2017), en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, emplearon la zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. Los resultados demostraron que cumple los requisitos para ser usada como puzolana, al desarrollarse mayores resistencias a la compresión, aumento de este comportamiento en el tiempo, tal y como es característico de las reacciones puzolánicas. Ello ha permitido lograr hormigones de altas prestaciones, cuyos resultados al año alcanzan una resistencia a la compresión de aproximadamente 979 Kg/cm³, mientras que las probetas de control 859 Kg/cm³, demostrando que se mejoró la resistencia alrededor de un 14%.

Lo anteriormente abordado demuestra las capacidades de la zeolita como material de uso en la construcción. Como estrategia económica del país, gran cantidad de recursos están enfocados en relacionar la zeolita con la construcción. En ese caso, la Unidad Geominera Holguín perteneciente a la Empresa Geominera de Oriente y al Grupo Empresarial Geominsal del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), es una entidad líder en la extracción y procesamiento de minerales no metálicos, con 18 años de experiencia. Para el cumplimiento de sus objetivos y metas organizacionales, ha desarrollado la misión de ejecutar la explotación, procesamiento y comercialización de minerales metálicos y no metálicos, y productos industriales a partir de materias primas minerales.

Sin embargo, el estudio exploratorio realizado para determinar la situación problemática a partir de entrevistas realizadas a los directivos de la empresa y la revisión de sus documentos fundamentales, evidenció las siguientes irregularidades:

- Insuficiente cultura de los directivos de las empresas constructoras en la utilización de la zeolita como aditivo en la producción de hormigón en la construcción.
- Necesidad de proyectos que vinculen a la zeolita con la construcción a gran escala en el país

Es por ello que se declara como **problema de investigación** las limitaciones en el aprovechamiento de la zeolita natural como materia prima en la UEB Geominera Holguín, no permiten diversificar las producciones alternativas en el sector de la construcción. Se declara como **objeto** las producciones alternativas en el sector de la construcción y como **campo** la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín en las producciones alternativas del sector de la construcción. Para solucionar las dificultades declaradas se propone como **objetivo general** evaluar el comportamiento de la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín como agregado que permita la diversificación de las producciones alternativas en el sector de la construcción.

Del objetivo general se originan los siguientes **objetivos específicos**:

- Sistematizar los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la utilización de la zeolita natural como material de construcción.
- Evaluar el comportamiento de la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín como agregado.
- Diseñar alternativas para el empleo de la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín como materia prima en la producción de materiales alternativos en el sector de la construcción.

Se declara como **hipótesis de investigación** la siguiente: si se evalúa el comportamiento de la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín como agregado a partir de sus potencialidades físicas y mecánicas, se podrán diversificar las producciones alternativas en el sector de la construcción. La constatación de la hipótesis de la investigación el cumplimiento de los objetivos y la solución del problema requirieron de la implementación de métodos para la investigación científica.

Métodos teóricos:

- Histórico-lógico: para conocer la utilización de la zeolita natural como materia prima en la producción de materiales alternativos en el sector de la construcción.
- Hipotético-deductivo: para realizar una propuesta de hipótesis acorde a la investigación.
- Análisis - síntesis: para el análisis de la información procedente de la caracterización histórica, teórico – metodológica y empírica del objeto y campo de la investigación.
- Sistémico estructural funcional: para conformar el aporte de la investigación con un enfoque sistémico que considere su estructura, componentes y relaciones que se dan entre ellos.

Métodos empíricos:

- Análisis documental: para determinar los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la utilización de la zeolita natural como materia prima en la producción de materiales alternativos en el sector de la construcción
- Observación científica: para realizar el trabajo de campo, con el objetivo de determinar el estado actual del objeto y el campo de investigación.

Método estadístico:

- Estadístico descriptivo: para realizar la gestión, recepción, procesamiento, representación e interpretación de las informaciones derivadas del diagnóstico del objeto y campo de la investigación.
- Método estadístico matemático: para interpretar y analizar los resultados obtenidos.

- Triangulación de datos: se utiliza en la fase exploratoria y en la investigativa para recoger datos de diferentes fuentes, contrastarlos y realizar una valoración convergente o una comprensión más global del campo de investigación.

Se **aportan** alternativas para el empleo de la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín en el sector de la construcción. La novedad consiste en el empleo de la zeolita natural como material alternativo para brindar soluciones más económicas y eficientes.

El presente trabajo de diploma tiene **actualidad** por la pertinencia del tema para las empresas constructoras y por la necesidad de minimizar en el municipio Holguín el uso de arena de origen natural y de cemento Portland. Responde a la Agenda 2030 y al objetivo de desarrollo sostenible, número 12, Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, mediante la reducción de la utilización de los recursos, la degradación y la contaminación durante todo el ciclo de vida.

Da respuestas a los lineamientos 7, 74 de la Política económica y social del Partido y la Revolución, para el periodo 2021-2026 al propiciar la protección del entorno, enfatizar en la conservación y el uso racional de los recursos naturales y promover la intensificación del reciclaje.

L-7. Alcanzar mayores niveles de productividad, eficacia y eficiencia en todos los sectores de la economía a partir de elevar el impacto de la ciencia, la tecnología y la innovación en el desarrollo económico y social, así como de la adopción de nuevos patrones de utilización de los factores productivos, modelos gerenciales y de organización de la producción.

L-74. Situar en primer plano el papel de la ciencia, la tecnología y la innovación en todas las instancias, teniendo como base la estrategia de trabajo del Gobierno con las instituciones de la ciencia, la misión que corresponde a la Academia de Ciencias de Cuba y la implementación de las políticas aprobadas, con un sentido amplio de participación en el cumplimiento de los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social.

L-136. Desarrollar y modernizar la Industria Minera mediante la creación, recuperación y ampliación de las capacidades productivas, garantizando la sostenibilidad de las reservas de los principales recursos minerales, el desarrollo de productos con un mayor valor agregado e incremento de las exportaciones, a partir de los recursos minerales estudiados de oro, cromo, sal, carbonato de calcio, zeolitas, cobre, plata, plomo, zinc, de materiales de construcción, entre otros.

L-178. Recuperar e incrementar la producción de materiales para la construcción, que aseguren los programas inversionistas del país, la expansión de las exportaciones y la venta a la población. Desarrollar producciones con mayor valor agregado y calidad. Lograr incrementos significativos en los niveles y diversidad de las producciones locales de materiales de construcción y divulgar sus normas de empleo.

Responde a las líneas de investigación asumidas por el departamento de construcciones de la Facultad de Ingeniería que derivan de las aprobadas en la Universidad de Holguín, como son: Innovación para el desarrollo sostenible. Además, al área del conocimiento asumida en el departamento para la gestión de la ciencia y la innovación tecnológica: Gestión de la producción y comercialización de los materiales de la construcción y la gestión de desechos sólidos y biomasa.

El trabajo de diploma se estructura en introducción y dos capítulos. En el primer capítulo se hace una caracterización histórica y teórico-metodológica de la utilización de la zeolita natural como materia prima en la producción de materiales alternativos en la construcción. En el segundo se muestra el proceder para lograr las propuestas de dosificaciones necesarias, a partir de la argumentación teórica para la producción de los mismos. Se muestran las conclusiones generales y bibliografías que se utilizan para enriquecer la investigación.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DEL USO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos del objeto y campo de estudio. Se esclarece la definición de zeolita natural, su clasificación, composición, ciclo de vida, así como sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Se aborda sobre el uso de la zeolita como material de construcción, se exponen sus potencialidades así como sus deficiencias y se tienen en cuenta las experiencias obtenidas de anteriores usos en el campo.

I.1 La zeolita natural. Generalidades y ciclo de vida

Las zeolitas naturales se formaron después de millones de años a partir de cenizas volcánicas depositadas en lagos de agua salada. Con el tiempo y bajo el efecto del medio alcalino, las cenizas se alteraron y cristalizaron para convertirse en zeolitas. En sentido general su nombre proviene de dos palabras griegas “zein” que significa hervir y “lithos” piedra. Fueron empleadas en la antigüedad como piedras de construcción.

En América Latina, y concretamente en Cuba, los primeros yacimientos de zeolita fueron identificados a principios de los años 70. Comienzan sus estudios sobre posibles aplicaciones a mediados de esa década, obteniéndose resultados alentadores en aplicaciones agropecuarias y particularmente en alimentación animal. Las zeolitas (SiO_2) son un grupo de minerales aluminosilicatos hidratados pertenecientes a los tectosilicatos. Químicamente están conformados por aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, potasio y agua.

Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones práctica. Se encuentran entre los minerales autógenos más comunes en las rocas sedimentarias. No obstante, debe decirse que se forman en un amplio rango de rocas de diferentes orígenes, edad y ambiente geológico de deposición (Maldonado 2020)

Según Breck (1974) en Pérez y Urbina (2021), todas las zeolitas son consideradas como tamices moleculares, que son materiales que pueden absorber selectivamente

moléculas en base a su tamaño. Por su parte, Mumpton (1978), refiere que si se mira la composición química las zeolitas se pueden separar en siete familias: Analcima, Chabazita, Natrolita, Estilbita, Heulandita, Gismondina y Harmotoma

En cuanto a su forma de obtención se clasifican en dos grandes grupos: naturales y sintéticos. Las naturales son extraídas de yacimientos, mientras las sintéticas son producidas artificialmente en laboratorios. En la actualidad se conocen casi doscientos tipos de zeolita de las cuales más de 40 son naturales (Pérez y Urbina 2021).

En su estructura la zeolita presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares variables, en los cuales, además de moléculas de agua, adsorbatos y sales, se encuentran los cationes de compensación. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa (Bosch y Schifter, 1997 en Costafreda, 2011), lo que permite la transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio circundante; condicionada por el diámetro de los poros (Demuth, 2000 en Costafreda 2011)

Diversos son los diámetros moleculares que presenta la zeolita y que le proporciona una propiedad muy particular, de gran uso industrial, conocida como selectividad geométrica o de forma. Las zeolitas pueden clasificarse según (Costafreda, 2011) en:

- Zeolita de poro extragrande ($\theta > 9$).
- Zeolita de poro grande ($6 < \theta < 9$).
- Zeolita de poro mediano ($5 < \theta < 6$).
- Zeolita de poro pequeño ($3 < \theta < 5$).

Conocer su ciclo de vida permite determinar los momentos en los que se puede actuar correctamente en su gestión y ayuda a tomar conciencia de la responsabilidad social en este sentido. También conocido como balance ambiental en la Norma Cubana NC ISO 14040 (2009) comprende las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima, de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición de materia prima, de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final. Específicamente en el caso de la

zeolita se asume el propuesto por Valenzuela y Chérrez (2017) en Pérez y Urbina (2021), quienes plantean que comprende las siguientes etapas:

- **Extracción:** se extrae el mineral en la cantera a cielo abierto por ser un mineral no metálico que se somete a un proceso de trituración física y no interviene ningún elemento químico.
- **Molienda:** se inicia el proceso de trituración en la planta, primero se procede con la fase de limpieza del material, mediante el uso de una zaranda vibratoria con la que se elimina cualquier material extraño. El siguiente proceso es alimentar a la trituradora y mediante bandas transportadoras para llevar el material a los molinos de impacto hasta lograr la granulación deseada.
- **Envasado:** Se envasa en sacos de acuerdo a la necesidad del cliente, con la finalidad de aislar el material del ambiente externo y también para evitar que pequeñas partículas o polvo salgan del saco al exterior.

I.1.1 Propiedades físico-mecánicas de la zeolita

Las propiedades físicas de la zeolita deben considerarse de dos formas:

- a) desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, tipos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión;
- b) desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantez, color, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste. (De la Cruz y Villanueva, 2006)

La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción mineralógica básica y una evaluación de la estabilidad con respecto a la hidratación, las cuales se consideran dentro de las aplicaciones comerciales específicas (Giannetto, 1990, en Bustillos, Suin y Mejías (2014). Sus características generales dependen básicamente de la estructura y de la composición química de cada sólido (Costafreda M., Martín, Belén y Costafreda V., 014); y entre ellas pueden mencionarse:

- a) diámetro de poro: 0.2 a 1,2 nanómetro (nm)
- b) diámetro de cavidades: 0,6 a 1,2 nm
- c) superficie interna: varios cientos de m²/g
- d) capacidad de adsorción: < 0,35 cm³/g
- e) estabilidad térmica que oscila entre los 200° hasta más de 1 000°C.

Las propiedades más relevantes de las zeolitas naturales son: porosidad, adsorción e intercambio iónico.

a) Porosidad

Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Sing et al. 1985) en (Cháves 2021). Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos.

Las características porosas de la zeolita afectan positivamente la permeabilidad y la durabilidad del hormigón como se demuestra en los resultados de las investigaciones realizadas por (De la Cruz, Colorado, y Del Campo, 2015) que realizaron pruebas de resistencia a compresión y de permeabilidad usando el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio. Tras todos los ensayos realizados se consiguieron obtener hormigones con proporciones de zeolita del 5% y 10% que presentaron una adecuada trabajabilidad. Por un lado, la incorporación de zeolitas como aditivo produjo una mejora en las propiedades mecánicas. En otro sentido, las características durables de este tipo de hormigón también se vieron igualmente mejoradas, verificándose además la ausencia de reactividad de tipo álcali-sílice.

a) Adsorción

La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, y por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (Curi, Granda, Lima y Sousa 2006) en (Chavez 2021).

b) Intercambio iónico (I.I)

La capacidad de intercambio iónico de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química. (Breck, 1974) Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. (Curi, Granda, Lima y Sousa 2006) en (Chavez 2021). La Capacidad de intercambio iónico teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles (Breck 1974) en (Chavez 2021).

I.1.2 Ventajas y desventajas

La zeolita natural como materia prima ofrece grandes oportunidades para el desarrollo de futuros materiales de construcción. Pueden utilizarse para sustituir hasta un 40% del cemento Portland. Para la obtención del hormigón ligero con propiedades específicas, se obtienen resistencias a la compresión entre 50 y 300kg/cm² y densidad entre 500 y 1500 kg/m³ (Rosell et al, 2006) en (Valenzuela y Cherrez 2017)

- **Ventajas**

El empleo de zeolitas en los diseños de mezclas, tanto de morteros como de hormigones, disminuye la permeabilidad de las estructuras, cerrándose así el acceso de los sulfatos desde el exterior. En el caso de morteros, garantiza la humedad

duradera en el proceso de reacción, por su propiedad de retención liberación de líquidos. No solo contribuirá a la perfecta hidratación de los silicatos de reacción más lenta, como los bicálcicos, sino también a la correcta saturación de las partículas del cemento.

El uso de zeolitas en morteros y hormigones puede mitigar, incluso evitar, ciertos fenómenos muy importantes por su carácter destructivo, como la reacción álcalis-sílice y álcalis carbonato, ambos responsables de la fisuración y expansión en estructuras hormigonadas (Costafreda y Parra, 2011). Le imprime, además, gran fuerza de compactación al concreto al estimular las fases de hidratación, debido a su estructura porosa y cristalina y a su amplia área de contacto. Al reemplazar 20% de su peso por zeolita, el concreto logra una fuerza de 3 570 psi en 7 días, hasta 6 280 psi a 28 días.

De igual manera, ahorra combustibles en la fase de producción, puesto que para fabricar 1 kg de clinker se requieren 900Kcal de energía; así, 10 ton de zeolita empleada como puzolana ahorran alrededor de una tonelada de combustible. Disminuye, además, la inestabilidad causada por el exceso de cales en el cemento seco, debido a que no contiene elementos arcillosos que obstaculizan la adherencia y disminuyen la fuerza global del concreto. Cuando la zeolita modificada se agrega a la mezcla de concreto, esta se rehidrata y expulsa el aire, formando burbujas en el cemento fraguando, con lo cual aligera la estructura y amplía el volumen del concreto.

Reduce, también, costos de proceso ya que su densidad específica es 2.5 veces menor que la de la arena, obteniendo un mayor volumen por el mismo peso. Disminuye la inestabilidad causada por el exceso de cales en el cemento fraguado, debido a que contiene reducidas cantidades de óxido de calcio y está libre de hidróxidos de calcio que obstaculizan la adherencia y disminuyen la fuerza global del concreto. Igualmente, facilita el curado del concreto debido a que mantiene la humedad gracias a su estructura porosa, así como minimiza el agrietamiento del concreto debido a la contracción del fraguado.

- Desventajas

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua / aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo Cemento Portland (CPo), si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla (Alujas, 2010), (Apolinaire, 2015) en (Alujas y Perez 2018). Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la capa hidratada, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y, para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Martirena, 2003), (Arikan, 2009), (Alujas, 2010) en (Alujas y Pérez 2018)

I.2 La producción de materiales de construcción con zeolita natural

La zeolita natural ha sido utilizada ampliamente en la producción de hormigones, morteros, asfalto y bloques de hormigón. Los contenidos apreciables en sílice y en alúmina, los bajos contenidos en sulfato y materias orgánicas, y una molienda adecuada, entre otros, son las causas de la eficacia de este material a la hora de aportar valores apreciables de resistencias mecánicas a edades cercanas y superiores a los 28 días.

Algunos de los resultados prácticos, obtenidos en investigaciones con tobas de composición dacítica, evidencian la capacidad de sustituir al cemento Portland de alta resistencia inicial en morteros y hormigones. (Costafreda et al., 2011). Otros han dirigido su objetivo al empleo de las zeolitas naturales como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad (Rosell, 2007). Igualmente, la reducción de las temperaturas de producción y colocación de las mezclas asfálticas con el empleo de zeolita. Se traduce en una serie de ventajas tales

como la disminución del consumo de energía y de emisiones, el incremento de las distancias de transporte de la mezcla, el aumento de los tiempos de colocación y mejoras en la trabajabilidad y compactibilidad. Esta reducción debe ir acompañada del logro de una calidad adecuada de las mezclas producidas a menores temperaturas. (Mamani, 2018).

En el caso específico de la producción de bloques huecos, según Consuegra y Martínez (2009), la introducción de tobas zeolíticas, se precisa de ajuste a los métodos de dosificación, en especial al determinar las proporciones entre los áridos para lograr la máxima compacidad. Esto se fundamenta en el exceso de pasta que se produce por la diferencia de densidad del material con el CPO. Es posible producir prefabricados de hormigón de pequeño formato con mezclas que incluyan combinaciones de CPO y puzolanas naturales (tobas zeolíticas) sin que se afecten las propiedades físico-mecánicas.

Se evidencia entonces, que el uso de puzolanas permite el diseño de mezclas de hormigón más impermeables, cuyo período de deterioro se reduce. Se observa, además, que los valores de absorción de los bloques donde se adiciona tobas zeolitizadas en lugar del cemento es menor que el porcentaje de absorción de los bloques de referencia. Ello está relacionado al refinamiento eficiente de la estructura de poros debido al efecto físico y a la reacción puzolánica; característica de este tipo de materiales puzolánicos. (Morales, Leyva, Urrutia y Almenares, 2017).

I.3 Experiencias del uso de zeolita natural como material de construcción

Los cementos adicionados son aglomerantes hidráulicos, producidos por la molienda de un material conocido como puzolana que se ha incorporado al cemento. Para este caso en particular en investigaciones realizadas por Egeuz (2004) el porcentaje adicionado de puzolana fue del 20%. Estas pastas hidratadas bajo ciertas condiciones generan soluciones de hidróxido de calcio que alcanzan todavía niveles de saturación, el cual da una de las características más importantes que marca la diferencia entre los dos cementos.

El cemento puzolánico es la resultante de la incorporación de la puzolana (zeolita) al cemento Portland en una proporción que debe ser del 15-40% de la mezcla de la masa según la norma ASTM C595 (Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados). Es esta incorporación la que lo provee de diversas características y propiedades. Por tanto, el desarrollo de resistencia en hormigones con puzolanas tiene como regla general el incremento en las resistencias finales comparadas con los cementos Portland puros. (Robalino, 2004).

Las muestras para esta prueba se prepararon de acuerdo a la norma ASTM C109/C109 M-99 *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Para este ensayo se emplearon dos tipos de dosificaciones, para 6 y 9 cubos. En este caso se realizaron mezclas de 9 cubos. Una de las mezclas se le denominó patrón, ya que es la que contenía cemento Portland, y la otra mezcla se la denominó muestra, ya que se le agregó un 20% de zeolita al valor de la masa del patrón.

Para las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron muestras de 9 cubos cada uno y con estas se obtuvieron los valores de sus resistencias a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 14, 28, y 90 días respectivamente. Para esto se utilizó la prensa, y con esto se obtuvieron los valores que se muestran a continuación (tabla 1). Se realizaron, además, pruebas de índice de puzolanidad, de acuerdo al método de la ASTM C109/C109 M-99.

Tabla 1. Comparación de las resistencias a compresión

Días	Resistencias (MPa)	
	Muestra	Patrón
1	9,26	12,66
3	21,14	23,99
7	30,87	33,6
14	35,38	36,84
28	40,06	37,61
90	40,40	37,27

Fuente: Robalino (2004).

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de la prueba de compresión simple a las diferentes edades y se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 2). El principal logro fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, que ya el reemplazo del 20% de este material por cemento Portland cumple con el requerimiento que establece la especificación ASTM C618-03 a los 7 y 28 días de edad.

Las muestras estudiadas superaron el índice de 75% que dicha especificación requiere para el uso de puzolanas naturales en hormigón. Los valores encontrados al usar nuestra puzolana fueron de 91,86% a los 7 días y 106,5% a los 28 días. De la misma manera los resultados obtenidos superan los requerimientos especificados para puzolanas en la elaboración de cementos compuestos según la especificación ASTM C595-03. Se pudo comprobar también que el índice de actividad puzolánica se incrementó en las muestras de reemplazo que permanecieron curadas permanentemente; así como determinar un incremento del 8% a los 90 días.

Tabla 2. Índice de Puzonalidad

Muestra (M)/patrón (P)		Resistencia (MPa)	Índice de Puzolanidad (%)
M	1	9,26	73,15
P	1	12,66	
M	3	21,14	88,12
P	3	23,99	
M	7	30,87	91,86
P	7	33,60	
M	14	34,38	96,03
P	14	36,84	
M	28	40,06	106,50
P	28	37,61	
M	90	40,48	108,61
P	90	37,27	

Fuente: Robalino (2004).

En el caso de Valenzuela (2017), su investigación se basa en la sustitución de cemento por un 10, 20 y 30% por zeolita. El agregado fino y el agregado grueso pertenecen a la cantera “La Península”, en Ecuador; el Cemento es Portland Puzolánico Tipo IP “Selvalegre”, y la zeolita es natural tipo Clinoptilolita. Los ensayos se realizaron conforme a los lineamientos establecidos en las normas NTE INEN y ASTM, con la finalidad de obtener información necesaria para la dosificación del hormigón.

El resultado obtenido en los ensayos de laboratorio sobre la densidad aparente en relación con el porcentaje óptimo de la mezcla, se muestra en la figura 1.

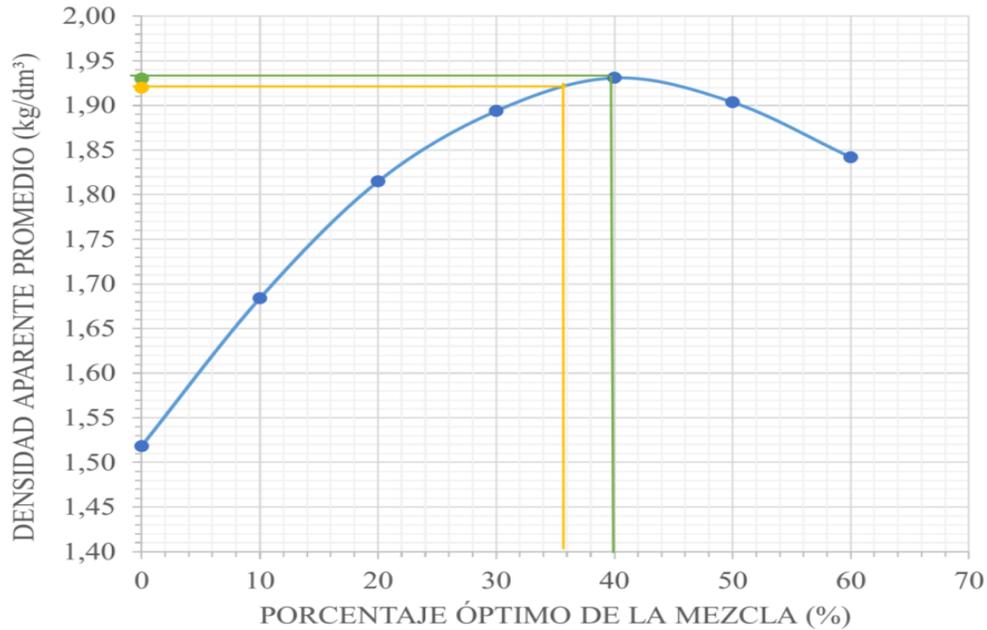


Figura 1. Densidad aparente.

Fuente: Valenzuela (2017)

De igual manera, sustituyendo el 10, 20 y 30% de cemento por zeolita, la densidad en estado fresco se reduce, en comparación con el hormigón tradicional (figura 2). Los estudios evidenciaron que el hormigón elaborado con la sustitución del 10 % de cemento por zeolita natural supera en 5.75, 4.66 y 3.55 (7, 14 y 28 días) al límite superior establecido. En el caso del hormigón elaborado con la sustitución del 20% de cemento por zeolita natural se encuentra bajo el límite inferior establecido lo que demuestra que este porcentaje no cumpliría con la resistencia a la compresión de diseño, $f'c$ 240 kg/cm². El hormigón elaborado con la sustitución del 30% de cemento por zeolita natural se encuentra bajo el límite inferior establecido lo que se demuestra que este porcentaje no cumpliría tampoco con la resistencia a la compresión de diseño

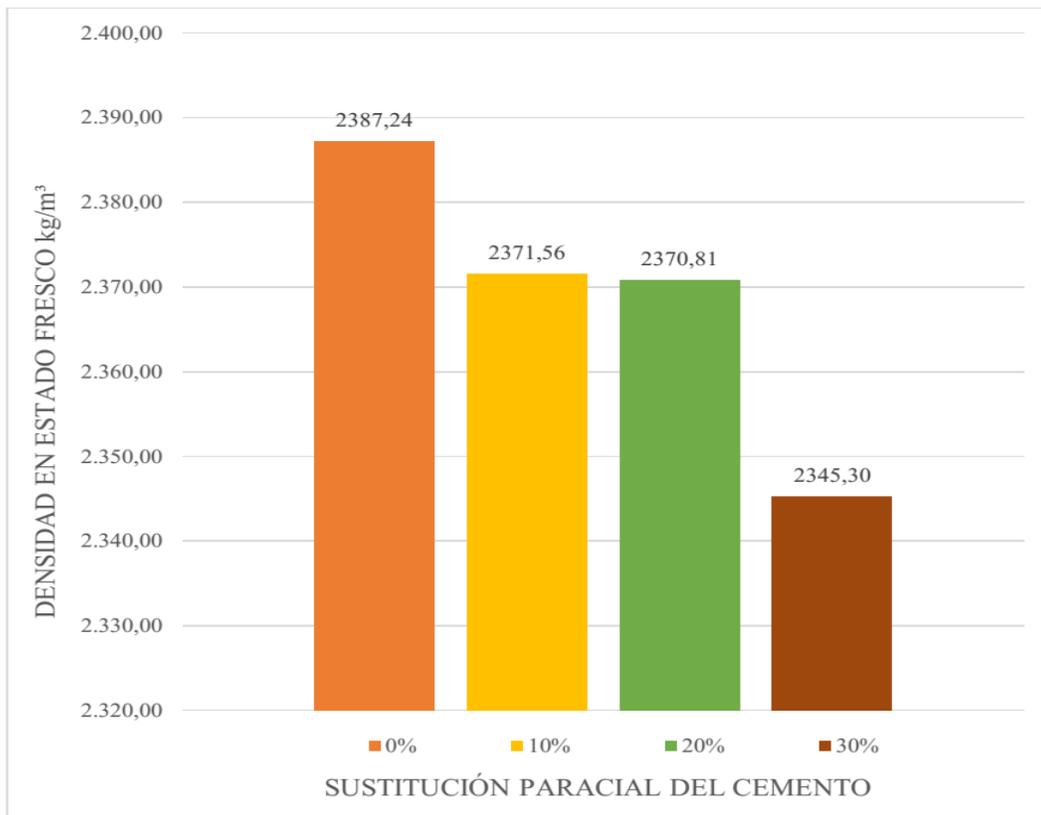


Figura 2. Densidad en estado fresco.

Fuente: Valenzuela (2017)

Otros estudios son las investigaciones realizadas por Rodríguez y Coello (2021). Ellos realizaron pruebas de resistencia a compresión con el objetivo de utilizar dosificaciones que sustituyen entre un 10 y un 20% al cemento, agregando zeolita. Se evidencia (figura 3) que al paso del tiempo el hormigón gana resistencia y se puede comprobar el comportamiento típico de este material.

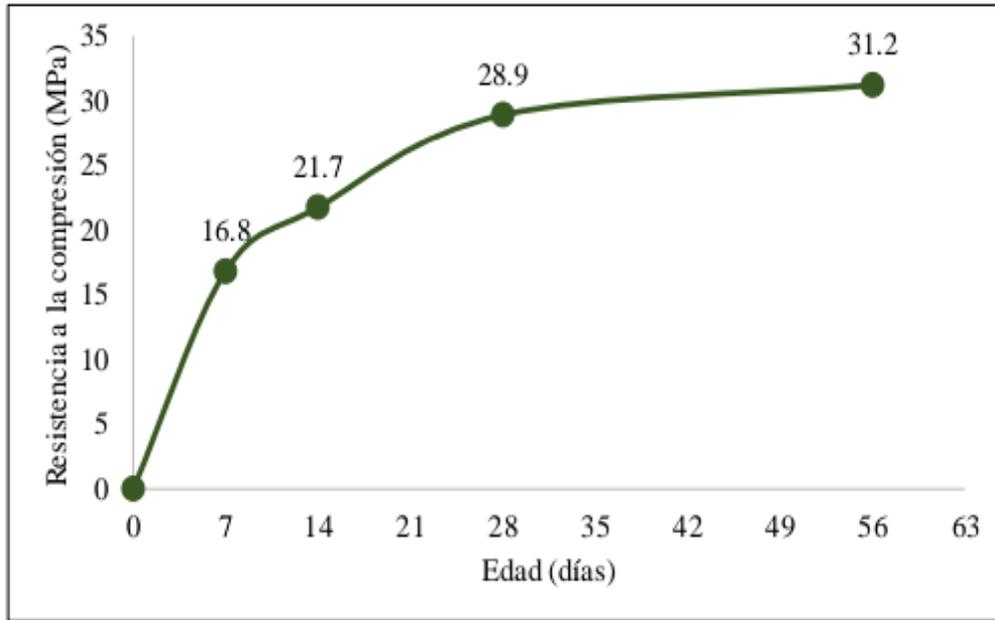


Figura 3. Resistencia a compresión de la muestra de control

Fuente: Rodríguez y Coello (2021).

También se refleja en la figura 4, el comportamiento a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 durante un periodo de ensayo de 7 a 56 días. Las líneas entrecortadas azul y roja indican los límites superior e inferior del esfuerzo a compresión de un hormigón de 24 MPa. Como se puede observar la mezcla de control se encuentra dentro del rango común llegando a superar el límite en los 28 y 56 días, mientras que las mezclas con sustitución de zeolita en los diferentes por cientos no alcanzan la resistencia y se ubican por debajo del mínimo requerido para un hormigón de 24 MPa. De esta manera, concluyen los autores, que la zeolita no puede reemplazar al cemento en proporciones entre un 10 % y 20 % en la dosificación de un concreto estructural de 24 MPa, pues su esfuerzo máximo a compresión a los 28 días de edad no podrá ser alcanzado, y las propiedades mecánicas del hormigón no serán las adecuadas.

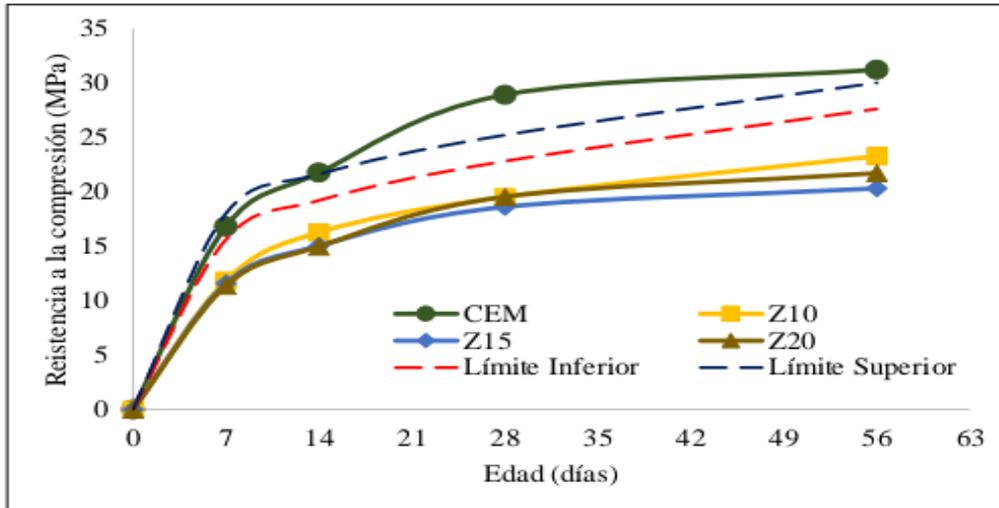


Figura 4. Resistencia a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 durante un periodo de ensayo de 7 a 56 días

Fuente: Rodríguez y Coello (2021).

Por su parte Panimbosa y Medina (2022) realizan estudios con sustituciones de hasta un 20% de cemento por zeolita, donde el tiempo de fraguado inicial obtenido en la pasta con cemento tipo GU (General Use) tiene lugar a los 53 minutos y el final a los 280 minutos. En las pastas con contenido de zeolita el tiempo de fraguado inicial ocurrió entre los 107 y 127 minutos, y el final entre los 305 y 390 minutos. Ello demuestra que, al usar zeolita como sustituto del cemento, aumenta la demanda de agua para que la pasta entre en consistencia normal y por tanto un mayor tiempo de fraguado.

Estos resultados en cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, arrojaron que los hormigones con zeolita a la edad de 28 días llegaron a superar o quedaron muy cerca, en comparación con el hormigón de control, dependiendo de la cantidad de zeolita usada como sustituto. El hormigón que tiene el 20% de sustitución de cemento por zeolita prestó adecuadas condiciones bajo la penetración de agua a presión (figura 5a, b y c)

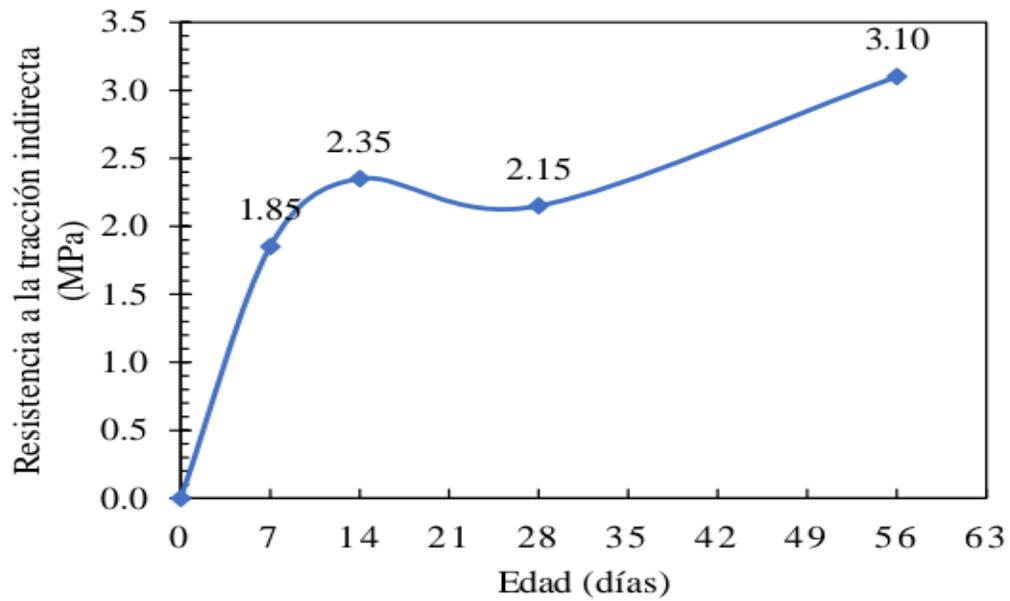


Figura 5a). Resistencia a la tracción indirecta del hormigón a la edad de curado.

Fuente: Panimbosa y Medina (2022)

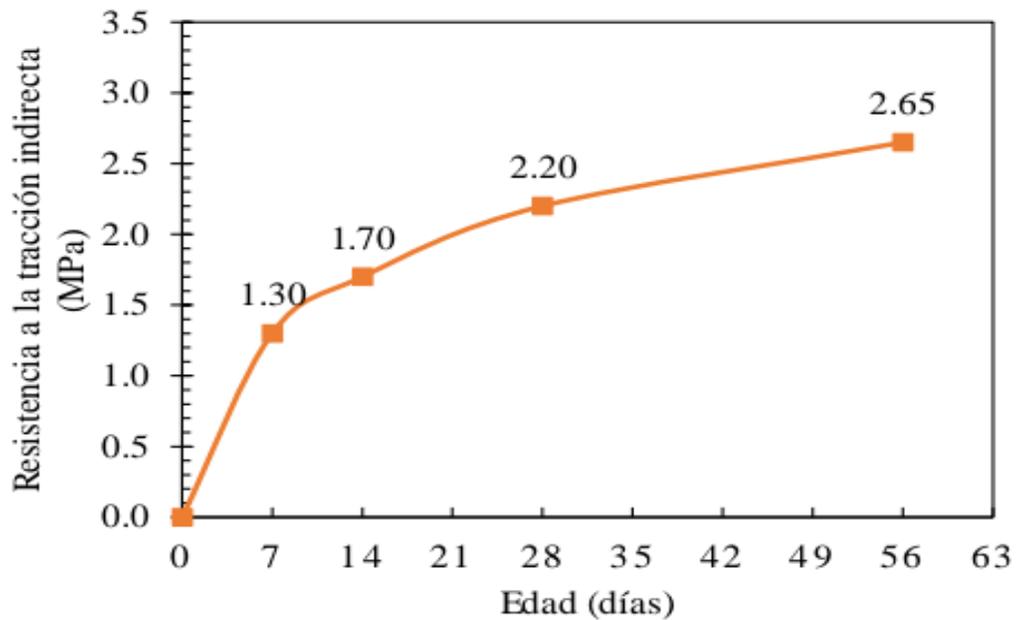


Figura 5b). Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con 10% de agregado de zeolita.

Fuente: Panimbosa y Medina (2022)

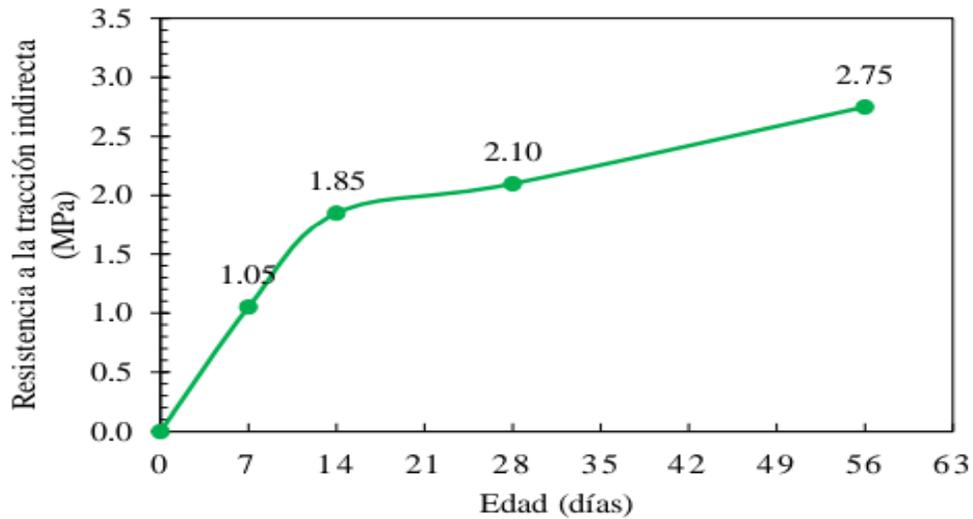


Figura 5c). Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con 20% de agregado de zeolita.

Fuente: Panimbosa y Medina (2022)

El asentamiento medido por el cono de Abrams conforme la NTE INEN 1578/ASTM C143 (Método de prueba estándar para el asentamiento de concreto de cemento hidráulico) muestra que el asentamiento de las mezclas que incorporan zeolita como sustituto se ven reducidas (Panimbosa y Medina, 2022) (figura 6).

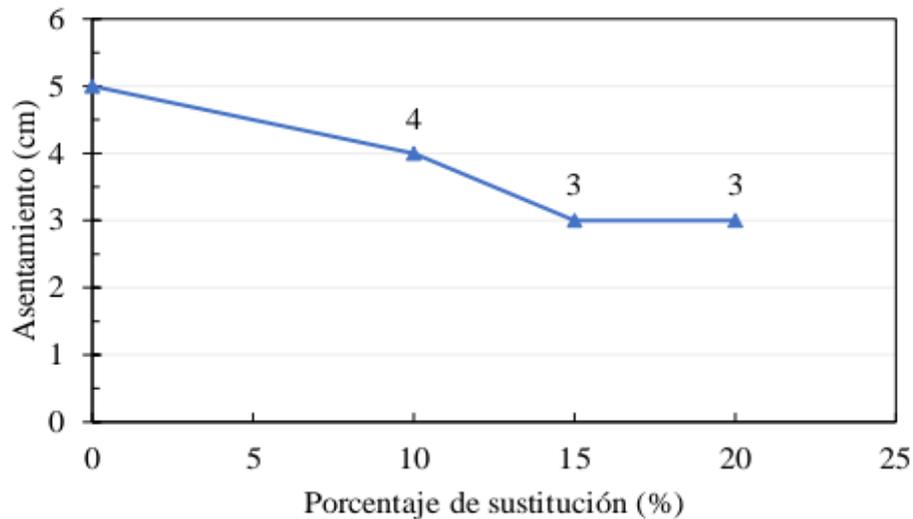


Figura 6. Asentamiento por el cono de Abrams de las muestras estudiadas.

Fuente: Panimbosa y Medina (2022)

Al evaluar estos resultados los autores concluyeron que:

- Las pastas que contienen zeolita como sustituta parcial del cemento demuestran que, mayor es la demanda de agua para lograr la consistencia normal. Esta varía entre 31.5 y 32.5 % para porcentajes de sustitución comprendidos entre el 10 y 20%. Esto se traduce en agua adicional del 2.5 al 5.5% a la requerida en la pasta de cemento tipo GU, que tiene una consistencia de 30.8%.
- La zeolita en las mezclas de hormigón reduce el asentamiento medido por el cono de Abrams y obliga a utilizar un aditivo plastificante para garantizar la trabajabilidad, fenómeno que se explica por la mayor superficie específica en relación con el cemento tipo GU, además de su estructura interna microporosa.

I.3.1 Experiencias en Cuba

Las zeolitas naturales son abundantes en Cuba, encontrándose mayormente las clinoptilolitas, mordenitas y heulanditas. Varios de los yacimientos han sido estudiados para su utilización como material de construcción, como árido ligero, basados fundamentalmente en su bajo peso volumétrico, como adición en la producción de cementos mezclados y en la producción de un aglomerante alternativo base cal (cemento romano) dada su actividad puzolánica.

Rosell y Galloso (2001) y Rosell (2001, 2006, 2007, 2009 y 2011), han dirigido sus investigaciones al empleo de las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de Tasajeras, Provincia de Villa Clara, como material de construcción. Principalmente lo han realizado en la producción de cementos y otros aglomerantes, y como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas, como la impermeabilidad y durabilidad.

La zeolita cubana se emplea ampliamente como adición mineral en los hormigones, teniendo en cuenta su influencia en la formación de aluminatos cálcicos (Rosell, 2009). Su uso como puzolanas naturales en la industria del cemento, hormigones y morteros ha permitido incrementar el rendimiento y la vida útil de las cementeras cubanas, con

el consiguiente ahorro económico y la mejora medioambiental que esto supone. Tanto las patentes aprobadas como las nuevas innovaciones, demuestran que el uso de zeolita molida hasta fracciones inferiores a los 0,8 milímetros garantiza una excelente durabilidad de los hormigones.

Esto se traduce en una mejor compactación y en el incremento de fases mineralógicas física y químicamente más resistentes que la portlandita. Del mismo modo, Pérez (2006), establece la caracterización geológica y tecnológica de la zeolita del yacimiento de Guaramanao, orientada hacia su aplicación como material de construcción alternativo. El sistema propuesto se aplica en el municipio de Holguín y demuestra la factibilidad de su uso. Como principal resultado se propone, el empleo de la materia prima para diferentes fines como materiales de construcción alternativos, específicamente áridos y hormigones ligeros. Sin embargo no realiza ensayos encaminados a su utilización.

En el caso de Cabrera (2010), valora un grupo de materiales tobáceos para su utilización como puzolana natural dentro de los cuales se encuentran las tobas de Sagua de Tánamo, Guaramanao, Caimanes y San Andrés. En la investigación se logra determinar la resistencia a la flexotracción y a la compresión de morteros elaborados con la sustitución de 15 y 30 % de tobas por cemento, cuyos resultados evaluados fueron favorables. No obstante, en la investigación no determina el índice de puzolanidad y la caracterización granulométrica se realiza por vía seca, lo que quiere decir que los resultados pudieron verse afectados, debido a que lo recomendado para clases de tamaño pequeñas es el método por vía húmeda. Además se analiza el material solo a los 7 y 28 días, lo que impide conocer si las resistencias se incrementan en el tiempo.

Con este criterio, Pérez, et. al (2013) han logrado reducir el uso de cemento Portland entre el 12 y el 20 %, manteniendo inalterable su calidad. De este modo, ya se fabrican hormigones armados y losas huecas a escala industrial, con una mayor coherencia, un mejor acabado y un correcto recubrimiento del acero para su protección contra la corrosión, preferentemente en vías férreas.

También, Carbonell (2017), estudia las tobas zeolitizadas del yacimiento Palenque, Municipio Yateras en la Provincia Guantánamo. Bajo el concepto de rendimiento del cemento, propone abaratar el costo en la producción de morteros, bloques y hormigones hidráulicos. Se sustituyó un 15, 30, y 50% de cemento por tobas zeolitizadas, para lo que se elaboraron 42 bloques distribuidos en tres lotes, en correspondencia con los porcentos de sustitución. Para un 15%, 18 bloques y 12 bloques para las sustituciones de 30% y 50%, respectivamente.

Se realizaron 42 ensayos de resistencia a la compresión a bloques de tipo III que conformaron 7 muestras. El ensayo de resistencia a la compresión se produjo mediante una prensa hidráulica, con una velocidad de carga entre 10 y 20 kgf·s/cm² (0,10 a 0,20 kN·s/cm²), a los 28 días (figura 6).

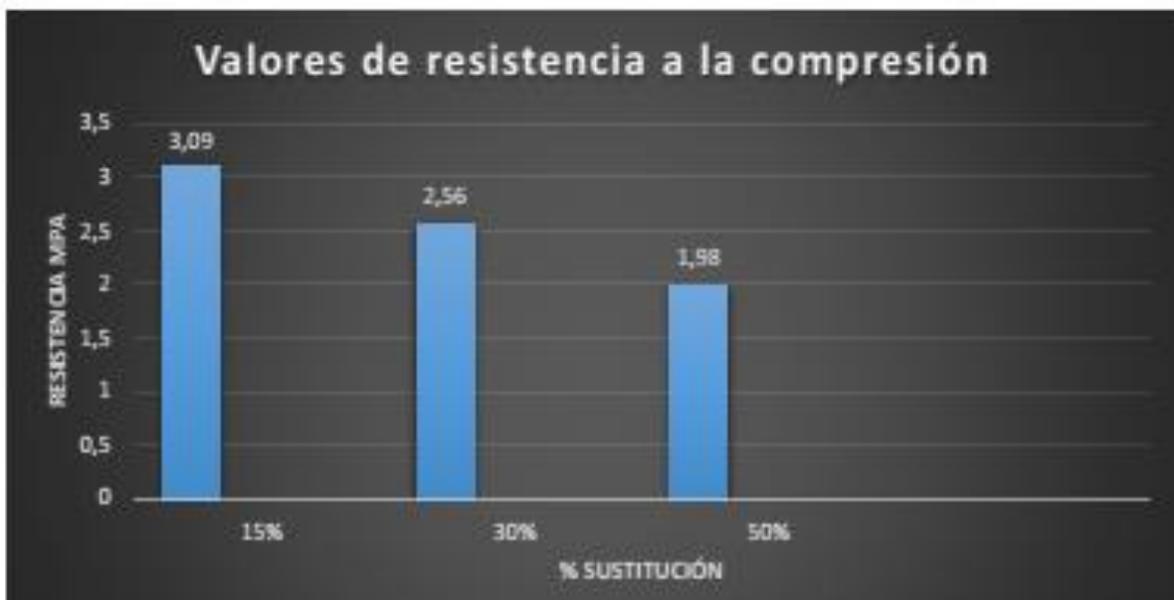


Figura 6. Resistencia a compresión de los bloques con 15, 30 y 50% de tobas zeolitizadas.

Fuente: Carbonell (2017).

Como se observa, los resultados obtenidos en la sustitución de material tobáceo en un 15 % y 30% superan la resistencia mínima a los 28 días que exige la NC 247:2010 Bloques huecos de hormigón-especificaciones, para su empleo en la elaboración de productos de bloques de hormigón. En el caso del 50% la resistencia se queda por debajo, alcanzando solamente 1.98 MPa.

I.3.2 Experiencias en Holguín

Diversos han sido los estudios de las tobas zeolitizadas en la Provincia Holguín. Costafreda (2008) propone en su investigación el empleo de zeolitas naturales procedentes del yacimiento Loma Blanca, San Andrés (Holguín). Para la fabricación de morteros, introduce en el proyecto de dosificación de las mezclas, sustituciones de cemento Portland por zeolita entre un 25 y un 30%, respectivamente. Los resultados de los ensayos físicos y mecánicos revelaron resistencias normales a compresión superiores a los 50 MPa, en tan solo 28 días de fraguado.

Almenares (2013) emplea tobas vítreas y zeolitizadas en mezclas de morteros dosificadas en un 15 y un 30%. Como resultado se obtienen morteros con resistencias mecánicas adecuadas en períodos cercanos y superiores a los 28 días. Los índices de actividad resistente superaron en todos los casos el 75% establecido por la norma. Actualmente se comercializa esta patente en los proyectos de fabricación de viviendas de bajo coste en los municipios más orientales de la provincia Holguín.

Desde el año 2015, el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, de conjunto con la Escuela de Minas y Energía de Madrid (Martín, et al. 2015, 2016), desarrollan trabajos de investigación para la caracterización de materiales puzolánicos en la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Estas investigaciones comprenden una amplia variedad de recursos naturales entre los que, además de zeolitas, pueden mencionarse las perlitas, las arcillas caoliníferas, las tobas vítreas, las tobas riolíticas y el vidrio volcánico.

Los resultados obtenidos hasta el momento establecen el marcado carácter puzolánico de los recursos mencionados, específicamente de las tobas zeolitizadas de los yacimientos Caimanes (Sagüa de Tánamo) y Loma Blanca (San Andrés, Holguín).

Asimismo, han demostrado que los cementos puzolánicos elaborados a partir de estos materiales cumplen con los principales requisitos exigidos por las normas, principalmente en lo concerniente al índice de actividad resistente, densidad, coeficiente de absorción, contenidos en óxido de magnesio, residuos insolubles, sílice total y reactiva, entre otros importantes parámetros normalizados (Costafreda, et al. 2017).

Morales (2017), también propone la fabricación de bloques huecos de hormigón con árido grueso (granito 3/8" y árido fino procedentes de Cayo Guam) y polvo de piedra de la cantera Pilón en Mayarí). Para ello se sustituye un 15 % de cemento P-35 por tobas vítreas en una primera producción y zeolitizadas en un segundo momento.

Las curvas correspondientes a cada material están prácticamente superpuestas (figura 7, lo que indica que la composición granulométrica de ambas muestras es similar. En ambos casos, el 80 % del material cernido se encuentra en el tamiz de diámetro 67 μm , con un diámetro medio de partículas de 47,44 y 63,64 μm para las tobas zeolitizadas y tobas vítreas, respectivamente.

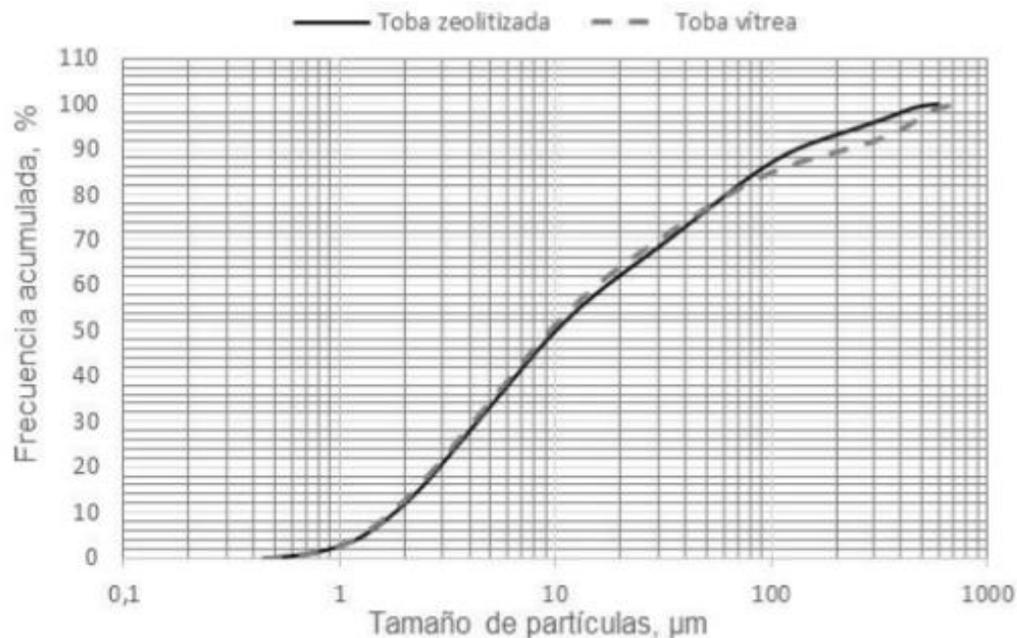


Figura 7. Característica de tamaño de las muestras de tobas vítreas.

Fuente: Morales (2017)

En comparación con el valor máximo de 34 % retenido en el tamiz 45 μm , establecido por la norma NC TS 528:2013 para su utilización como puzolana natural se puede plantear, que ambos materiales analizados presentan características granulométricas adecuadas, que le confieren perspectivas para ser empleados como aditivos puzolánicos al cemento, dado que el retenido en el tamiz 45 μm es igual 24,32 y 25,15 % para las tobas vítreas de Sagua de Tánamo y las tobas zeolitizadas de Caimanes, respectivamente.

En el caso específico de las tobas zeolitizadas los resultados evidencian que la muestra ensayada cumple con lo establecido en la NC 247: 2010 — Bloques huecos de hormigón — Especificaciones, la cual indica que para los bloques tipo II el porcentaje de absorción debe ser menor de 10 %. Este resultado muestra que el uso de puzolanas permite el diseño de mezclas de hormigón más impermeables, cuyo período de deterioro se reduce (tabla 3). Esto está relacionado con el refinamiento eficiente de la estructura de poros debido al efecto físico y a la reacción puzolánica; característica de este tipo de materiales puzolánicos.

Tabla 3. Absorción de los bloques tipo II con tobas zeolitizadas.

Tipo de bloque	Masa del bloque seco promedio (kg)	Masa del bloque húmedo promedio (kg)	Absorción (%)
II (con tobas zeolitizadas)	16,13	17,13	6,18
II (muestra patrón)	12,80	14,00	8,57

Fuente: Morales (2017)

Se ensayaron 36 bloques huecos de hormigón, de ellos 6 bloques de tipo II con sustitución del 15 % de cemento por tobas vítreas, 6 de tipo II con sustitución del 15 % cemento tobas zeolitizadas y 6 patrones de tipo II. De igual forma se procedió a ensayar la misma cantidad de bloques de tipo III, obteniéndose que todos los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la NC 247: 2010, a la edad de 7 días y a los 28 días.

En el caso de Pérez y Urbina (2021), a partir del método de triangulación plantean que la zeolita constituye una adición activa que presenta acción puzolánica de disponibilidad local que presenta buen comportamiento ante parámetros de resistencia mecánica e indicadores de durabilidad en hormigones. Constituye, una alternativa viable para ser usada en mezclas cementicias, con la ventaja del ahorro económico que implica un menor consumo de cemento acompañado de un menor impacto ambiental.

Por tanto, su empleo en la producción de hormigones permite:

- Disminuir la porosidad total aumentando la compacidad de la mezcla y la durabilidad del hormigón al eliminar las fisuras.
- Disminuir la permeabilidad de las estructuras, cerrándose así el acceso de los sulfatos desde el exterior.
- Mitigar, incluso evitar, ciertos fenómenos muy importantes por su carácter destructivo, como la reacción álcalis-sílice y álcalis carbonato, ambos responsables de la fisuración y expansión en estructuras hormigonadas.
- A medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita, se produce pérdida de consistencia; lo que la convierte en un material con gran capacidad de retención de agua.
- Permite un aumento de la resistencia con el tiempo, debido a los procesos de hidratación del cemento y a la contribución del efecto puzolánico de la adición en las mezclas con zeolita. Esta ganancia de resistencia a largo plazo justifica afirmar que es viable y a la vez satisfactorio realizar el reemplazo del cemento por parte de zeolita pues se logra una importante contribución en el desarrollo

de hormigones sustentables cuya producción genera menor impacto al ambiente con menores costos.

Conclusiones parciales

El análisis de los fundamentos teórico – referenciales y las experiencias identificadas permitieron obtener las premisas para el aprovechamiento de la zeolita natural como material de construcción, por lo que se resulta una experiencia factible, posibilitando la sustitución de materiales tradicionales y aportando múltiples beneficios tanto económicos como medio ambientales.

La sistematización de las referencias en Cuba y específicamente en el municipio de Holguín, evidencian que existen limitaciones en el aprovechamiento de la zeolita natural como material de construcción al no considerarse sus potencialidades físicas y mecánicas.

CAPÍTULO II. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE USO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN HOLGUÍN

En este capítulo se aborda la solución al problema de la investigación. Para ello se diseñan concepciones metodológicas a partir de premisas y dimensiones. Se diagnostican el potencial y las características de la zeolita de la Unidad Empresarial de Base Geominera de Holguín y a partir de las experiencias internacionales y nacionales se determinan las propuestas de alternativas de uso de la zeolita natural como material de construcción en Holguín.

II.1 Concepciones metodológicas para la propuesta de alternativas de uso de la zeolita natural como material de construcción

Para la realización de cualquier estudio de valorización de materias primas o materiales, es necesario establecer una serie de criterios que permitan encausar las acciones a seguir con el fin de lograr un correcto desarrollo. Estos se materializan a través de premisas, cualidades, proceso o ciclo de valorización y la contextualización de sus dimensiones, que posibiliten enfocar las propuestas con mayor efectividad (figura 8).

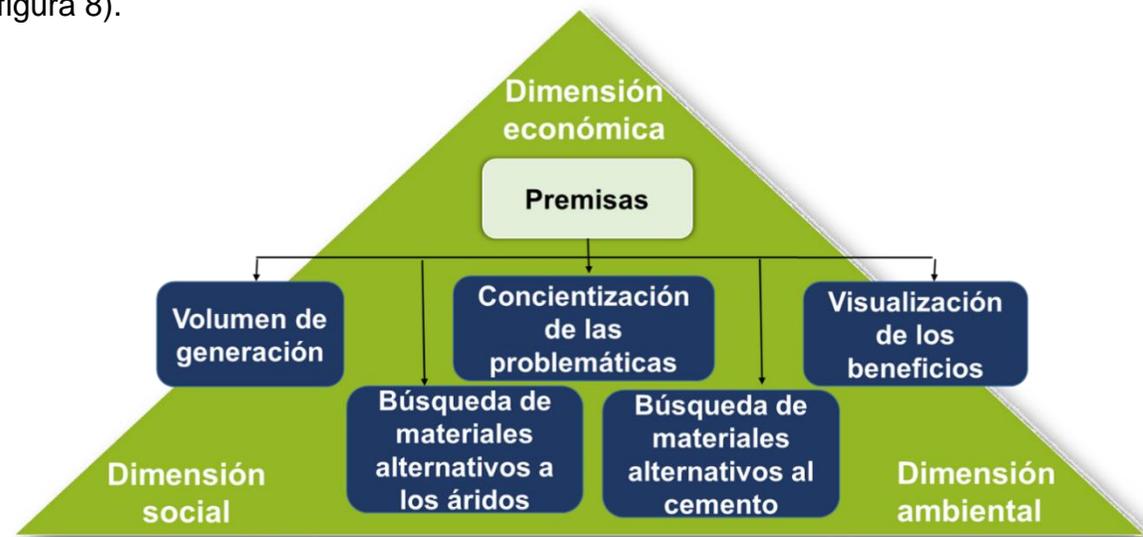


Figura 8. Concepciones para la propuesta de alternativas de uso de la zeolita natural como material de construcción.

Fuente: Pérez y Urbina (2021).

- Premisas:

Constituyen afirmaciones o ideas que ocurren y sirven de base para el razonamiento del proceso de valorización. En este caso, específicamente, se describen las siguientes:

- a) Volumen de generación

Se deben considerar los volúmenes de generación de la planta de zeolita de San Andrés para evaluar la sostenibilidad de la propuesta de empleo como material de construcción.

- b) Búsqueda de materiales alternativos a los áridos naturales

La alta demanda de áridos naturales para la producción de materiales de la construcción trae consigo el agotamiento de recursos naturales por lo que se hace necesario la búsqueda de materias primas alternativas que se puedan utilizar para su remplazo.

- c) Búsqueda de materiales alternativos al cemento:

La alta demanda del cemento en la construcción de obras sociales, así como los impactos ambientales asociados a su fabricación, son elementos a considerar para la búsqueda de alternativas.

- d) Concientización de la problemática

El incremento en los volúmenes de generación de zeolita natural y las limitaciones en su empleo en el sector de la construcción.

- e) Visualización de los beneficios

En la valorización de la zeolita natural descansa la oportunidad de dar respuesta a las problemáticas planteadas en las premisas anteriores.

- Cualidades de la materia prima:

El estudio de las cualidades permite conocer los rasgos que distinguen la zeolita natural de San Andrés, Holguín, desde el punto de vista de sus características físicas, químicas y mecánicas para ser utilizado de forma eficiente. De igual manera para el análisis de la valorización de la zeolita natural en la producción de materiales de

construcción, se deben cumplir dimensiones ambientales, económicas y sociales que reflejen los puntos de vista para su concepción (Pérez y Urbina, 2021).

- Dimensión ambiental:

Los impactos más significativos de la producción de materiales de construcción, se encuentran sobre los recursos naturales, por la consiguiente extracción de materias primas y en el proceso de elaboración. Tal situación hace necesario llevar a cabo una adecuada gestión de manera que permita aprovechar las potencialidades de la zeolita natural para minimizar el uso de árido de origen natural en el sector de la construcción.

- Dimensión económica:

La valorización de la zeolita natural contempla varios aspectos de carácter económico. Entre los fundamentales se encuentran su incorporación como materia prima en el sector de la construcción, específicamente en la producción de materiales y productos, lo que permitirá diversificar la producción y por ende las transacciones financieras.

II.2 Potencialidades de la zeolita natural de Loma Blanca en San Andrés, Holguín

En el yacimiento de zeolita de Loma Blanca, ubicado en San Andrés a unos 23 km al NW de la ciudad de Holguín en la provincia de Holguín, afloran tobas zeolitizadas, que representan la parte superior del corte. (Cabrejas, Fernández y Leyva, 2014). Dentro de sus características geológicas según Rizo et al, (1988, se considera que se desarrolla en una secuencia de rocas vulcanógeno-sedimentarias de edad cretácica, dentro de los límites de la formación Loma Blanca (figura 9).

Estructuralmente el yacimiento tiene una forma estrecha y alargada con dirección NE–SW a modo de escama tectónica con una extensión de algo más de 1 km, limitada por fallas. Las condiciones hidrogeológicas del yacimiento son de complejidad media, debido a la presencia de dos acuíferos: uno relacionado con las grietas y el otro relacionado con las fallas, ambos no confinados. La región es atravesada por numerosas fallas que afectan mayormente el piso estructural inferior, se observan dos sistemas fundamentales con direcciones NW-SE y NE-SW.

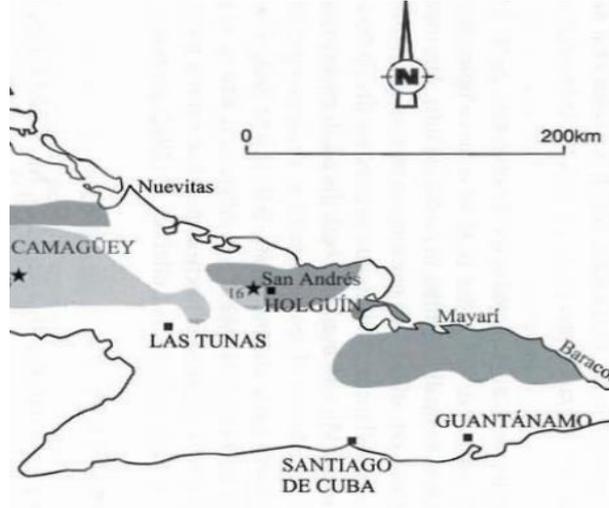


Figura 9. Localización del yacimiento Loma Blanca.

Fuente: Rizo (1998)

De manera general predominan las tobas vitroclásticas de composición andesito-dacítica, grano fino y color verde claro, en ocasiones algo amarillentas. Las tobas presentan diferentes grados de zeolitización y espesores variables al igual que el buzamiento. Su contenido promedio en el depósito es de 75 %, donde más del 80 % presenta una excelente calidad. Sus propiedades físicas y químicas se relacionan a continuación.

- Propiedades físicas (Cabreja, Fernández y Leyva, 2014)
 - Baja densidad (muy livianos).
 - Elevada capacidad de intercambio catiónico (potasio por sodio, calcio por magnesio o algunos metales pesados).
 - Elevado poder de absorción-adsorción.
 - Gran facilidad que presentan los minerales que pertenecen a la familia de las zeolitas para deshidratarse.

- Composición química.

Las zeolitas de Loma Blanca, presentan la siguiente composición (tabla 4). La zeolita del tipo Clinoptilolita–Heulandita resulta ser el mineral predominante acompañado de Mordenita. En general el contenido promedio de zeolita en el depósito es de 75 %, donde más del 80 % de los recursos calculados pertenecen al Tipo Natural de Mena (TNM) I(6), lo que denota una excelente calidad del yacimiento en cuestión, notándose por los estudios realizados posteriormente que la calidad del yacimiento aumenta en profundidad.

Tabla 4 Composición química

Elemento	Concentración %		Elemento	Concentración %	
	Mín	Máx		Mín	Máx
SiO ₂	63.0	68.6	CaO	2.78	5.78
Al ₂ O ₃	11.6	12.7	MgO	0.07	0.92
TiO ₂	0.3	0.45	PPI	10.8	11.02
Fe ₂ O ₃	1.07	2.08	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	8.61	
Na ₂ O	1.34	2.39	H ₂ O	3.44	
K ₂ O	1.09	1.50	ICT	120 – 150 meq /100 g	

Fuente: Quiñones (2020) y Pérez y Urbina (2021)

Por tanto, el yacimiento de San Andrés posee un potencial de recursos de zeolita donde el 75 % son de recursos Medidos + Indicados, lo que corrobora que no es necesario realizar trabajos de exploración geológica de grandes dimensiones. Los recursos del yacimiento aseguran una explotación continua por unos 50 años a razón de 150 000 t/año que fue el diseño inicial de la planta en sus inicios (Quiñones, 2020).

II.3 Propuesta de alternativas de uso de zeolita natural como material de construcción

Para la propuesta de alternativas se parte de considerar que los áridos gruesos y finos utilizados en el municipio provienen de la Cantera 200 mil. Estos son producidos mediante la trituración de rocas calizas, con una buena granulometría. Para su empleo se deben conocer sus principales propiedades físicas y químicas, las cuales son asumidas de Lahenz y Urbina (2018).

- Árido grueso Cantera 200 mil
 - Peso Específico Corriente = 2.64 g/cm^3
 - Peso Específico Saturado = 2.67 g/cm^3
 - Peso Específico Aparente = 2.72 g/cm^3
 - Absorción de agua = 1.08 %

Se tomaron los análisis granulométricos de los áridos de la cantera 200 mil, bajo la norma NC178:2002 (Áridos. Análisis Granulométrico)

- Grava
 - Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico de la grava de la cantera 200 mil se refleja en la tabla 5.

- Partículas de arcilla:

Según lo establecido en la NC-179:2002 Arena. Determinación de impurezas orgánicas para áridos gruesos, la grava de la cantera 200 mil no cuenta con partículas de arcilla.

- Material más fino que el tamiz de 0,074 mm (Nº 200):

El resultado del ensayo es de 0.90% y cumple con la NC-251:2013 Áridos para hormigones hidráulicos, por lo que el material es conforme.

Tabla 5. Análisis granulométrico de la grava de la cantera 200 mil.

Tamiz		Peso retenido	Peso Retenido	% Refinado	%
Tamiz (")	Mm	Parcial	Acumulativo	Acumulativo	Pasado
1	25-4	0	0	0	100
3/4	19-10	42	42	1	99
1/2	12-7	2285	2327	47	53
3/8	9-5	2354	4681	94	6
4	4-76	290	4971	99	1
F		29	5000		

Fuente: Informe laboratorio ENIA (2018)

- **Peso volumétrico:**

Fue utilizada la NC-181:2002 Áridos. Determinación del peso volumétrico para áridos gruesos y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- a) Peso volumétrico suelto = 1 390 Kg/m³
- b) Peso volumétrico compactado = 1 585 Kg/m³

- **Porcentaje de huecos:**

Según la NC-177: 2002 Áridos. Determinación del Porcentaje de Huecos. Métodos de Ensayo presenta un 39.96 %.

- **Índice de Triturabilidad:**

El resultado que se obtuvo fue de 9.75% por lo que no es conforme según la NC-251:2013.

- Polvo de piedra de la cantera 200 mil:
 - Análisis granulométrico:

Los ensayos granulométricos realizados al árido fino dan conformes según la NC 178: 2002 (tabla 6).

Tabla 6. Análisis granulométrico del polvo de piedra de la cantera 200 mil.

Tamiz (mm)	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido Acumulado	% Retenido Acumulado	% Pasado
9.52	0	0	0	100
4.78	8	8	2	98
2.36	154	162	32	68
1.18	80	246	49	51
0.6	80.5	326.5	65	35
0.3	67	393.5	79	21
0.15	51.5	445	89	11
0.075	33.5	478.5	96	4
Fondo	21.5	500	0	0

Fuente: Informe laboratorio ENIA (2018)

- Cálculo del Módulo de Finura:

El resultado del ensayo evidencia que el módulo de finura es 1,9 y está dentro del rango establecido por la NC 54-264:1984.

- Arena artificial de la Cantera 200mil
- Material más fino que la malla 0.074 mm (# 200) =1.35 %, conforme con la NC-251:2013.
- Módulo de finura =3.87, no conforme según la NC-251:2013.
- Partículas de arcilla: no contiene
- Peso volumétrico suelto =1523 kg/m³
- Peso volumétrico compactado =1745 kg/m³
- Porcentaje de vacío= 32.56%
- Peso Específico Corriente =2.58 g/cm³
- Peso Específico Saturado= 2.63 g/cm³
- Peso Específico Aparente= 2.72 g/cm³
- Absorción de agua = 2.0 %
- Zeolita natural de Loma Blanca San Andrés
- Análisis granulométrico (tabla 7)

Tabla 7. Granulometría de la zeolita de Loma Blanca, San Andrés

Tamiz (mm)	% Pasado
9.52	100
4.76	100
2.38	100
1.19	100
0.59	99
0.297	67
0.149	43
0.074	22

Fuente: Cabreja, Fernández, Leyva y Santana (2014)

- Material más fino que el tamiz 200 (malla de 0.074 mm)..... 12.1 %
- Partícula de arcilla..... No contiene
- Peso Específico Corriente..... 2 051 g/cm³
- Peso Específico Saturado..... 2 116 g/cm³
- Peso Específico Aparente..... 2 258 g/cm³
- Absorción de agua..... 3.1 %
- Peso Volumétrico Suelto..... 1 103 kg/m³
- Peso Volumétrico Compactado..... 1 235 kg/m³

Para la propuesta se analizan las características de las experiencias consideradas en el capítulo 1 para obtener una comparativa de los áridos empleados, específicamente los empleados por Rodríguez y Coello (2021) y los que brinda la cantera 200 mil (tablas 8 y 9). El análisis comparativo de la granulometría demuestra que las propiedades de los áridos de la Cantera 200 mil, Holguín y los de la Cantera de Ambato Ecuador son similares.

Tabla 8. Comparación granulométrica de los áridos gruesos

Tamiz (mm)	%Pasado	
	Cantera 200 mil (Holguín, Cuba)	Cantera Ambato (Ecuador)
34.1		100
25.4	100	82.9
19.1	99	39.5
12.7	53	15.63
9.52	6	7.94
4.76	1	0.29
2.38		0.04
1.19		
0.59		
0.297		
0.149		
0.074		

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 9. Comparación granulométrica de los áridos finos.

Tamiz (mm)	% Pasado	
	Cantera 200 mil (Holguín, Cuba)	Cantera Ambato (Ecuador)
34.1		
25.4		
19.1		
12.7		
9.52	100	100
4.76	98	100
2.38	68	88.2
1.19	51	67.54
0.59	35	49.33
0.297	21	31.52
0.149	11	17.53
0.074	4	7.01

Fuente: Elaborado por el autor

Por lo tanto se pueden utilizar los resultados obtenidos en la investigación realizada por Rodríguez y Coello (2021) donde se reemplaza hasta un 20% de cemento por zeolita y se alcanzan resistencias a compresión que cumplen con la norma NC: 247: 2010 Bloques huecos de hormigón. Especificaciones, tanto a edades tempranas así como la resistencia última (tabla 10).

Dosificación de la mezcla con zeolita al 10,15 y 20%.

Mezcla	Sustitución parcial (%)	Agua (lt)	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Plastificante (ml)
Z10	10	5.83	8.02	0.89	22.92	24.85	44.55
Z15	15	5.83	7.57	1.34	22.92	24.85	44.55
Z20	20	5.83	7.12	1.78	22.92	24.85	44.55

Fuente: Rodríguez y Coello (2021)

Los resultados de los ensayos de compresión realizados sobre la muestra reemplazando el 20% de cemento por zeolita a los 7, 14, 28 y 56 días, se muestran en la figura 8. Se evidencia que tanto a edades tempranas como a los 28 días la muestra supera la resistencia requerida según la norma NC: 247: 2010 Bloques huecos de hormigón. Como se muestra en el la figura 10, las resistencias obtenidas superan en gran medida las requeridas para fabricar bloques huecos de hormigón que según la norma cubana NC: 247: 2010 deben cumplir con un mínimo de 2.0 a 5.6 MPa a los 7 días y de 2.5 a 7 MPa a los 28 días. El uso de esta dosificación se puede considerar factible si se analiza concretamente la resistencia a compresión, pero se torna inviable en aspectos económicos ya que la dosificación no está optimizada para el uso en bloques.

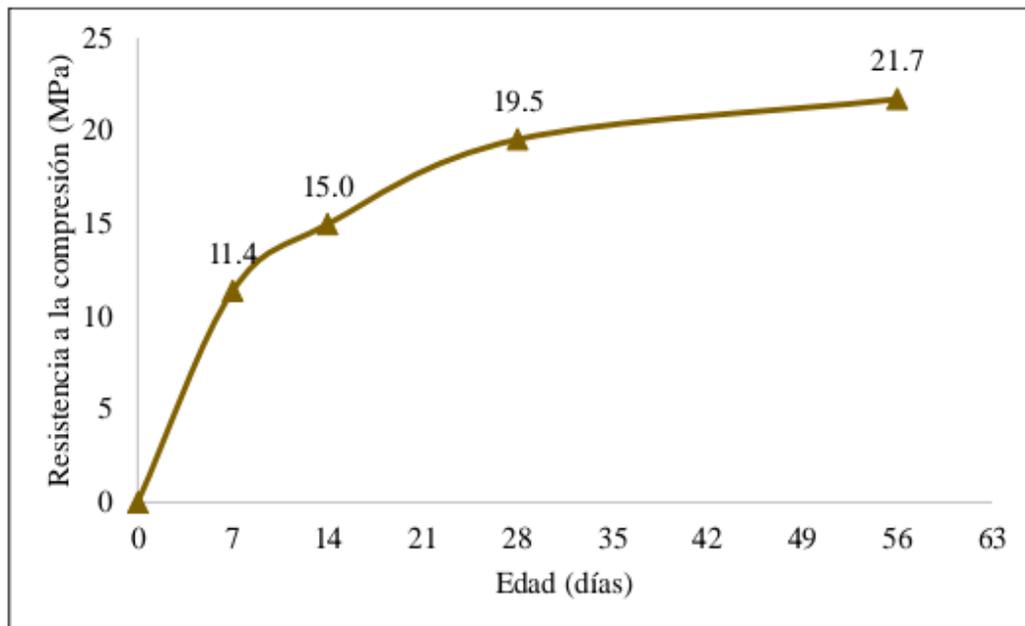


Figura 10. Resistencia a compresión de la muestra Z20

Fuente: Rodríguez y Coello (2021).

Para obtener un ahorro de cemento será necesario realizar ensayos que reduzcan el exceso de material utilizado en la muestra Z20 mediante el ajuste de la misma para las especificaciones requeridas en la norma NC: 247: 2010. Sin embargo, se considera que es la más económica y ecológica porque:

Por tanto, el empleo de zeolita natural en la producción de hormigones permite:

- Que la fricción entre los granos de la mezcla se haga menor, aumentando la coherencia y disminuyendo la fluidez con lo que se logra una mezcla de hormigón más compacta al reducir los espacios vacíos en la masa del hormigón.
- Al considerarse como microfiller debido a su granulometría (menor de 0.8 mm) permite rellenar espacios que los áridos finos no lo hacen originando el refinamiento de poros por la reacción puzolánica propia del material, haciendo más compacta la masa del hormigón al eliminar considerablemente las fisuras, pues al modificarse microestructura se reduce la permeabilidad y por tanto la penetración de agua. Todo esto influye positivamente en el aumento de la durabilidad del hormigón.

También se consideran en la propuesta, los resultados obtenidos por Carbonell (2017) en los ensayos mecánicos a los bloques elaborados con material tobáceo del yacimiento Palenque como material puzolánico. Para ello se realiza una comparación de la granulometría entre los dos tipos de zeolitas (tabla 11). Se tiene en cuenta las pruebas de las resistencias mecánicas. En el trabajo se emplea precisamente, para verificar cómo se comportan las resistencias con diferentes sustituciones de material tobáceo a la edad de 28 días, y determinar la dosificación más óptima para emplearlo como material cementicio suplementario.

Los resultados obtenidos en el caso de los valores de resistencia a compresión en los bloques muestran que las sustituciones de material tobáceo en un 15 y 30% superan la resistencia mínima a los 28 días que exige la NC 247:2010 para su empleo en la elaboración de productos de bloques de hormigón. En el caso del segundo lo hace ligeramente, llegando hasta 2,56 MPa, mientras que en un 50% la resistencia se queda por debajo, alcanzando 1,98 MPa.

Tabla 11. Análisis comparativo de las tobas zeolíticas.

Tamiz(mm)	%Pasado	
	Yacimiento Loma Blanca, San Andrés (Holguín)	Yacimiento Palenque de Yateras, Moa (Holguín)
34.1		
25.4		
19.1		
12.7		
9.52	100	
4.76	100	
2.38	100	
1.19	100	
0.59	99	100
0.297	67	91.2
0.149	43	53.6
0.074	22	11.4

Fuente: Elaborado por el autor

De igual manera se asumen los resultados de Morales (2017) quien, obtiene en ambos casos, una resistencia en los bloques superior a la de los patrones de referencia. Estos son resultados alentadores, y sería una base sólida para la producción de bloques con sustitución de 15 % de tobas vítreas y zeolitizadas por cemento P-35 (figura 11 y 12)

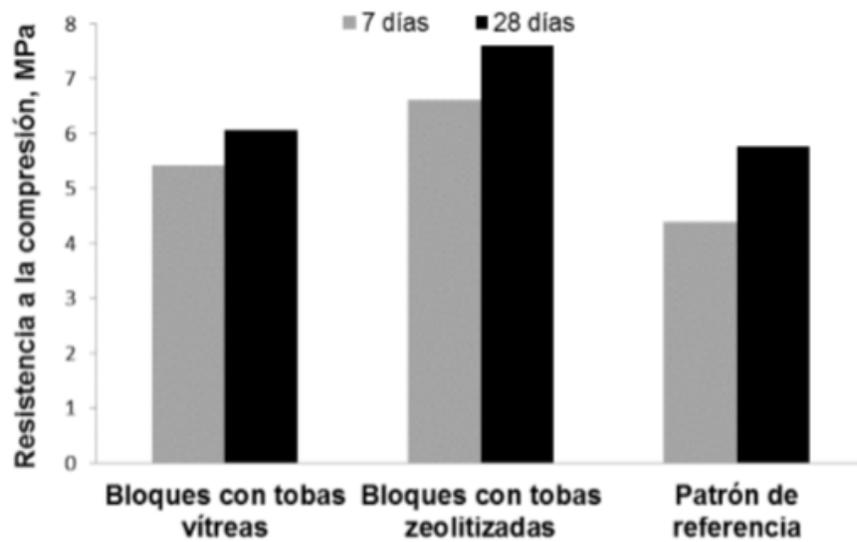


Figura 11. Resistencia a la compresión bloques tipo II

Fuente: Morales (2017)

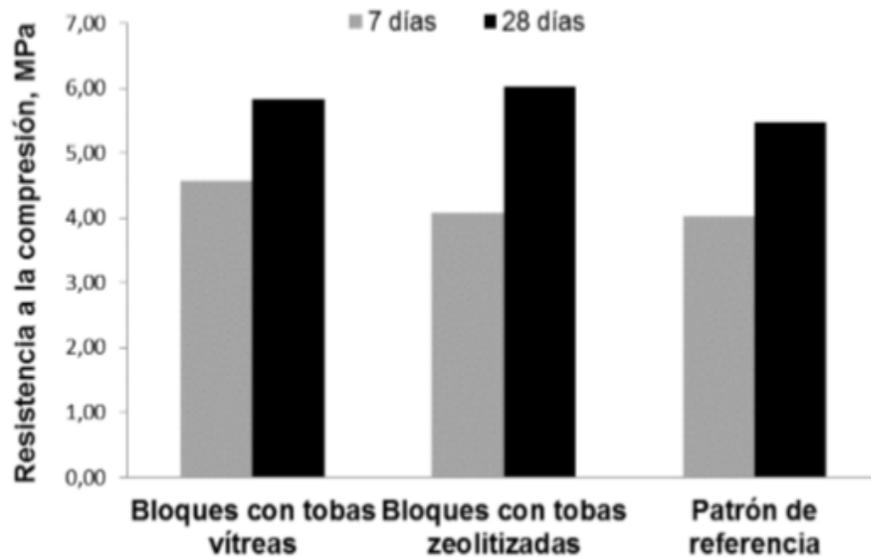


Figura 12. Resistencia a la compresión bloques tipo II

Fuente: Morales (2017)

Conclusiones del capítulo

Las concepciones metodológicas desarrolladas para la propuesta de alternativas de empleo de la zeolita natural, permitieron identificar las variables económicas y ambientales en las que inciden su incorporación como materia prima en la elaboración de nuevos productos.

El análisis de las principales características de la zeolita natural de Loma Blanca, San Andrés, Holguín, así como la sistematización de las experiencias internacionales y nacionales, dieron la posibilidad de determinar las ventajas del empleo de la zeolita en la producción de bloques huecos de hormigón.

CONCLUSIONES GENERALES

- La sistematización de los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la valorización de las zeolitas naturales como material de construcción, permitió comprobar que constituye una fuente de materia prima para la producción de materiales y productos de la construcción.
- La evaluación del comportamiento de la zeolita natural como materia prima en la producción de bloques huecos de hormigón, a partir de sus potencialidades físicas y mecánicas permitió definir su valorización como agregado en sustitución del cemento al disminuir la permeabilidad del producto terminado, incrementar los valores de resistencia a largo plazo, lográndose una importante contribución en el desarrollo de producciones sustentables que generan menor impacto al ambiente con menores costos.
- El análisis realizado a partir del método de triangulación de datos, permitió plantear que puede emplearse la zeolita natural de la UEB Geominera Holguín como sustituta del cemento en un 10, 15 y 20%, en la producción de materiales alternativos en el sector de la construcción.

RECOMENDACIONES

Se sugiere:

- Al Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín:
 - Continúe la investigación incorporando:
 - a) los ensayos de laboratorio necesarios para obtener los valores de resistencia del hormigón de acuerdo a los porcentos de sustitución de cemento por zeolita natural con los áridos presentes en el territorio.
 - b) nuevos estudios que permitan evaluar su empleo como árido

El autor deberá socializar el resultado de la investigación de conjunto con su tutora a través de publicaciones en revistas indexadas y la participación en eventos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMENARES R. y LEYVA, C. (2013). Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia de Holguín para su utilización como puzolana natural. V Congreso cubano de Minería (Minería´2013). V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias´2013. La Habana, Cuba.
- ALUJAS, A. (2010). Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Tesis doctoral, Universidad —Marta Abreu de Las Villas.
- ALUJAS, A. y PÉREZ, L. (2018). Reactividad Puzolánica de los productos de calcinación de las arcillas del depósito Yaguajay. Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.17p
- APOLINAIRE, E. C. (2015). Influencia de las características químico-mineralógicas de arcillas caoliníticas cubanas en la reactividad puzolánica de sus productos de calcinación Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
- ARIKAN, M., ET AL. (2009). Properties of blended cements with thermally activated kaolin. *Construction and Building Materials*, 23, 62-70.
- ASTM C109/C109 M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.**
- BADÍA, J. (2011). Incremento de la exportación de zeolita Geominera Holguín. Artículo Juventud Rebelde.
- BOSCH, P., Y SCHIFTER, I. (1997). La zeolite unapiedraquehierve. Fondo de culturaeconómica de México. Recuperado de: <http://www.juventudrebelde.cu/t>
- BRECK, D. (1974). Zeolita Molecular Sieves: Structure, Chemistry And Use. Wiley and Sons. London 1974. Recuperado de:
<https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpZMSSCU04/viewerType:toc/>
- BUSTILLOS A., SUIN M. Y MEJÍAS W. (2014). Diseño y construcción de un reactor químico para la obtención de zeolitas sintéticas. Trabajo de Diploma. Universidad de Cuenca.

- CABREJA, B. FERNANDEZ, A. y LEYVA, L. (2014). Diseño de mezcla de hormigón para la planta de prefabricado de Cueto, aplicando zeolita como material cementicio suplementario.
- CABRERA, M. R. (2010). Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 40 p.
- CARBONELL, N. (2017). Perspectivas de utilización de tobas zeolitizadas del yacimiento Palenque de Yateras como aditivo puzolánico. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Geólogo. Instituto Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- CHAVEZ, J. (2021). Tratamiento de la dureza de las aguas utilizando un filtro con espesor variable de zeolita. Trabajo de diploma. Universidad Nacional de Cajamarca.
- CONSUEGRA, Y. y MARTINEZ, L. (2009). Adecuación de las dosificaciones en las mezclas de hormigón para la fabricación de bloques en la UEB "Eladio Rodríguez". Trabajo de Diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CORELLA, C. (1988). Las zeolitas. Mineral del siglo xx. Usos y aplicaciones.
- COSTAFREDA, J.L. (2008). Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento. Revista, XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales.
- COSTAFREDA, J.L. (2011). Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales. Escuela superior de ingenieros de minas y energía, Universidad Politécnica de Madrid.
- COSTAFREDA. J.L. (2018). Las Zeolitas Naturales de Cuba.
- COSTAFREDA, J.L. Y PARRA, J. (2011). Contribución de la zeolita natural a la resistencia mecánica de cementos, morteros y hormigones. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.10p

COSTAFREDA, M., MARTÍN, BELÉN Y COSTAFREDA V., (2014). Las zeolitas naturales de Cuba. Recuperado de: http://oa.upm.es/50784/1/zeolitas_Cuba.pdf

COSTAFREDA, ET AL. (2017). Características de las rocas zeolitizadas de la región oriental de Cuba, y sus aplicaciones en la elaboración de cementos. En: "XII Congreso Nacional de Geoquímica y XI Congreso Ibérico de Geoquímica

CURI, A.; GRANADA, W.; LIMA, H.; SOUSA, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Información Tecnológica-Vol. 17, p 111-118.

DE LA CRUZ, B. y VILLANUEVA, G. (2006). Estudio de la Deshidratación de Alcoholes por Métodos de Adsorción Utilizando Tamices Moleculares. Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 62 p.

DE LA CRUZ J., COLORADO D., Y DEL CAMPO JM. (2015). Estudio comparativo de porosidad y permeabilidad de hormigones convencionales y hormigones con proporciones variables de adiciones de zeolitas naturales. Juan Carlos De La Cruz (Autor). Universidad Politécnica de Madrid.

DEMUTH, Th., BENCO, L HAFNER, J. y TOULHOAT, H. (2000). Adsorption of water in mordenite. An ab initio study. International Journal of Quantum Chemistry, vol. 84. pp. 110-116.

GAYOSO R. Y ROSELL M. (2003): Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones. V Conferencia Internacional de zeolita. Memorias [CD ROM], Universidad de la Habana, Cuba, marzo 2003.

GENER, M y MARTIN, A. (2001). Influencia de la demanda de agua en la durabilidad de morteros y hormigones elaborados con cementos mezclados con puzolanas.

GIANNETTO, P. (1990). Zeolitas: Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales, Caracas, Ed. Editorial Innovación Tecnológica

LAHENZ, E. y URBINA, M. (2018). Propuesta de dosificación para la producción de bloques huecos de hormigón con residuos de construcción de la planta de

prefabricado Gran Panel VI. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil Universidad de Holguín.

MALDONADO. Y. (2020). Zeolitas: Propiedades, características y usos recuperado del link <https://geologiaweb.com/minerales/zeolitas/>

MAMANI, L.A. (2018). Incidencias de la zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico. Trabajo de Diploma. Universidad Ricardo Palma, Escuela de Posgrado.

MARTIN, D.A., Costafreda, J.L., Leyva, C. y Costafreda, J.L. (Jr) (2015). Proyecto de Investigación y Desarrollo para la caracterización de materiales puzolánicos de la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Universidad Politécnica de Madrid. Resolución rectoral de 11 noviembre de 2014.

MARTIN, D.A., COSTAFREDA, J.L., LEYVA, C. y COSTAFREDA, J.L. (JR) (2016). Proyecto de Investigación y Desarrollo para la continuación de los trabajos de caracterización de materiales puzolánicos de la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Universidad Politécnica de Madrid. Resolución rectoral de 28 de octubre de 2015.

MARTIRENA J. F. (2003) Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa.

MORALES, A. (2017). Empleo de Tobas en la producción de bloques huecos de hormigón. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 22p

MUMPTON, F. (1978). Natural zeolites: Ocurrrence, Properties, Use, PergamonPress. Recuperado de: <https://www.worldcat.org/title/natural-zeolites-occurrence-properties-use/oclc/557731491>

- NORMA CUBANA NC 54-264:1984. Materiales y Productos de Construcción. Polvo de Piedra. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. Disponible en: nc@ncnorma.cu.
- NORMA CUBANA NC: 247: 2010 Bloques huecos de hormigón. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. Disponible en: nc@ncnorma.cu.
- NORMA CUBANA NC-251:2013. Áridos para Hormigones Hidráulicos Requisitos. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. Disponible en: nc@ncnorma.cu.
- NORMA CUBANA NC- ISO 14040 (2009). Gestión Ambiental. –Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. 2da Edición. Disponible en: nc@ncnorma.cu.
- PANIMBOSA, R. y MEDINA, W. (2022). Efecto de la zeolita como material suplementario del cemento portland en la resistencia a tracción indirecta del concreto estructural. Trabajo de Diploma. Universidad Técnica de Ambato.
- PEREZ, R. Y URBINA, M. (2021). La zeolita natural en la producción de hormigones en el sistema constructivo FORSA. Trabajo de Diploma. Universidad Oscar Lucero Moya.
- PÉREZ, R. Y. (2006) Características geológicas y perspectivas de utilización como material de construcción del vidrio volcánico del sector Guaramanao, San Andrés, Municipio Calixto García. Carlos Leyva Rodríguez (Tutor). Trabajo de
- PÉREZ, O. et.al. (2013). Generalización de la utilización de zeolita menor de 0.8 mmen la elaboración de hormigones. VI Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. Recuperado de:
http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2013_Perez_Garcia_MIN3-P1.pdf
- POON, M.; ROSELL, R. Y GAYOSO, B. (2006). Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones, Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción y Universidad Politécnica de Madrid, España.

ROBALINO, P. y EGUEZ, H. (2004). El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento puzolánico. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

RIZO, R. (1998). Depósitos de zeolitas naturales de Cuba. Acta Geológica Hispánica, V. 33 (1998), N° 1-4. pp. 335-349. Recuperado de: <https://raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/view/75555>

RODRIGUEZ, G. y COELLO, D. (2021). Efecto de la zeolita como material suplementario del cemento portland en la resistencia a compresión del concreto estructural. Trabajo de Diploma. Universidad Técnica de Ambato.

ROSELL, M. (2001). Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. I Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Red CYTED XIII-C.

ROSELL, M. (2007). Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias.

ROSELL, M. (2009). Zeolita como adición mineral activa en la producción de fibrocemento. III Congreso de Minería (MINERIA´2007) / IV Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. Tercera Convención Cubana de Ciencias de La Tierra, Geociencias´2009. La Habana, Cuba.

ROSELL, M. (2010). Zeolita natural cubana del tipo clinoptilolita-heulandita como material cementicio suplementario en hormigones. Ingeniería Civil Santa Clara, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

ROSELL, M. (2011). Influencia de la adición de zeolita en las propiedades micro y macro estructurales en pastas y morteros. IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Quito, Ecuador.

ROSELL, M. GALLOSO, R. Y CALVO, B. (2006). Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. Recuperado de: http://web.igme.es/Boletin/2006/117_4_2006/Art.%2014.pdf

SING, K.S.W., EVERETT, D.H., HAUL, R.A.W., MOSCOU, L., PIERROTTI, R., ROUQUEROL, J., SIEMIENIESWKA, T., "Presentación de datos de fisorción en sistemas gas/sólido", Pure Applied Chemical, v. 85, n. 57, pp. 603-619, January 1985.

VALENZUELA, Y. y CHERREZ, D. (2017). Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigo al emplear zeolita natural en remplazo parcial del cemento. Trabajo de diploma. Universidad Técnica de Ambato. Recuperado de:
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25828>