



Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés para la obtención de aglomerantes ternarios

Daylé Silega Martínez

Yasniel Hernández Primero

Especialidad: Ingeniería geológica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se evaluaron las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación a 350 °C, 500 °C y 650 °C para la elaboración de aglomerantes de base cemento Portland–toba zeolitizada–caliza. Para ello se determinó el índice de actividad puzolánica de estos materiales en el sistema cementicio cemento Portland–toba zeolitizada–caliza mediante la determinación de las resistencias a la compresión de morteros confeccionados con estos aglomerantes. Se realizó la caracterización granulométrica de las tobas zeolitizadas y los productos de su calcinación y se determinó la composición química y mineralógica de las tobas en estado natural. Todos los aglomerantes evaluados muestran un comportamiento positivo, alcanzando resistencias a la compresión superior a las exigidas a los cementos mezclados PP-25 y PZ-25.

Palabras clave: tobas zeolitizadas; cemento Portland; aglomerantes ternarios; índice de actividad puzolánica.

* Trabajo tutorado por Dr. Carlos Leyva Rodríguez.

Recibido: 12 junio 2016 / Aceptado: 30 noviembre 2016.

Potentialities for the production of ternary agglomerates of zeolitized tuffs of the San Andres ore body

Abstract: This investigation covers an evaluation of zeolitized tuffs contained in San Andres Ore Body and its products from calcination at 350, 500 and 650°C for the production of tuff-Portland zeolitized-limestone cement-base agglomerates. The index of pozzolanic activity of these materials in the making of tuff-Portland zeolitized-limestone cement by calculating the compressive strength of the mortar manufactured from these agglomerates. Zeolitized tuffs and the products resulting from calcination were characterized according to their particle size and the chemical and mineralogical composition of the tuffs in natural state was determined. All the agglomerates evaluated show positive results with compression strengths above the required for mixed cements PP-25 and PZ-25.

Key words: Zeolitized tuffs; Portland cement; ternary agglomerates; pozzolanic activity rate.

Introducción

El descubrimiento del cemento Portland ordinario como material cementante ha sido uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción. Su uso en los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de lograr una producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones han sido la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecedieron (Martirena, 2014).

Sin embargo, por sus altos volúmenes, su producción está asociada al 5 % del consumo energético del sector industrial y al 7 % de las emisiones de dióxido de carbono (Humphreys & Mahasenán, 2002), factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental (Martirena, 2014). Sus demostradas ventajas como material de construcción y su necesaria demanda para el desarrollo socioeconómico contrastan con un negativo impacto medioambiental, en un momento en que el cuidado del entorno y la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos deben estar entre las principales prioridades de la humanidad (Poll et al., 2016).

Los materiales cementicios suplementarios utilizados para sustituir al clinker principal, componente del cemento Portland y responsable del mayor consumo de energía, son desechos de procesos industriales, como las cenizas volantes, la microsílíce y las escorias de alto horno, además de puzolanas naturales como tobas zeolitizadas y cenizas volcánicas. Las tobas zeolitizadas, debido a la amplia distribución que tienen en nuestro país, constituyen uno de los materiales puzolánicos más perspectivas. Estos recursos alcanzan el orden de los 430 000 000 de toneladas métricas y según datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales, en Cuba son reportados más de 20 yacimientos.

Las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés han sido objeto de estudio de diversas investigaciones (Almenares, 2011; Pérez, 2011; Hidalgo, 2014) con el fin de valorar sus posibilidades para ser empleadas en la elaboración de aglomerantes binarios mezclándolas con cemento Portland. Estos estudios han revelado que estas mezclas binarias se comportan de manera favorable para sustituciones de hasta el 15 % del cemento, excepcionalmente del 30. Estos niveles de sustitución pueden ser superados mediante la activación térmica de estas tobas y su empleo en sistemas

cementicios ternarios, por ello la presente investigación evalúa las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación como materiales puzolánicos para la producción de aglomerantes de base cemento Portland–toba zeolitizada–caliza.

Materiales y métodos

Las propiedades puzolánicas de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación fueron valoradas mediante el índice de actividad resistente (IAR); para su determinación fue necesario realizar ensayos de resistencia a la compresión a morteros elaborados con aglomerantes a base de cemento Portland–toba zeolitizada–caliza, donde fueron empleadas las variantes con toba zeolitizada natural y calcinada a 350 °C, 500 °C y 650 °C.

Procesamiento de las muestras

Se tomó una muestra conjunta de 5 kg para garantizar la homogeneidad y fue extendida sobre la superficie de la lona cubriendo la mayor parte del área con una capa de un espesor constante. La muestra fue cuarteada y reducida a la mitad retirando de encima de la lona dos porciones no adyacentes. Este ciclo de mezclado, cuarteo y reducción fue repetido nuevamente quedando la muestra reducida a una masa de 1,25 kg y separada en cuatro porciones de 312,5 g.

Las toba zeolitizada y caliza fueron molidas, utilizándose para ello un molino de bolas de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud.

Caracterización de las materias primas

Caracterización granulométrica

Los análisis granulométricos de la toba zeolitizada natural y calcinada, del cemento Portland y de la caliza fueron realizados en un analizador de tamaño de partículas HORIBA LA–910. Los datos fueron registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador lo que permite obtener la curva granulométrica de cada muestra y el área superficial.

Determinación de la composición química

La composición química cualitativa y cuantitativa de las muestras se realizó por el método de fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de marca Axios, bajo una atmósfera de vacío.

Caracterización mineralógica

El análisis mineralógico se realizó por el método de difracción de rayos X (DRX), cuyas mediciones se realizaron en un difractómetro de rayos X Phillips X'Pert desde 5 hasta 80 grados 2θ , paso de $0,04^\circ$ en un tiempo de tres segundos y radiación de cobre.

Preparación de los morteros y elaboración de las probetas

Se elaboraron tres mezclas de cemento Portland P-35, caliza y toba zeolitizada calcinada a 350°C , 500°C y 650°C y una mezcla similar a las anteriores empleando toba zeolitizada natural. Cada mezcla aglomerante se dosificó de manera tal que, en términos de porcentaje de la masa del aglomerante, el cemento representara el 50 %, la caliza el 20 % y la toba el 30 % (Tabla 1). Obtenidos los aglomerantes se elaboraron los morteros, siguiendo lo establecido en la norma cubana NC-TS 527:2011.

Tabla 1. Dosificación de los morteros

Morteros	Aglomerantes						Arena (g)	Agua (ml)	Relación agua/aglomerante
	Cemento (g)	Caliza (g)	Toba Zeolitizada (g)						
			Natural	350°C	500°C	650°C			
TZ-N	225	90	135	-	-	-	1 350	270	0,6
TZ-350	225	90	-	135	-	-	1 350	270	0,6
TZ-500	225	90	-	-	135	-	1 350	270	0,6
TZ-650	225	90	-	-	-	135	1 350	270	0,6
Patrón	450	-	-	-	-	-	1 350	225	0,5

Se elaboraron seis probetas para cada tipo de mezcla aglomerante: tres para determinarles las resistencias mecánicas a los siete días y tres para determinárselas a los 28, lo que resultó en un total de 30 probetas.

Ensayos de resistencias mecánicas

Se realizaron ensayos para determinar la resistencia a la flexotracción. La carga fue aplicada verticalmente sobre la cara lateral de la probeta, incrementándose a una razón de $49 \pm 10 \text{ N/s}$ hasta lograr la rotura de la probeta.

Para la determinación del índice de actividad puzolánica se tomaron los resultados de los ensayos de compresión simple a los 7 y 28 días, tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia.

Valoración de los resultados

Los resultados de la determinación del índice de actividad puzolánica de los productos de la calcinación de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés ofrecen una medida de su reactividad y de sus posibles aplicaciones; estos resultados, junto a los de la determinación de las resistencias mecánicas y la caracterización granulométrica de los materiales son expuestos en este capítulo.

Caracterización de las materias primas

Caracterización granulométrica

A partir de los análisis granulométricos fueron construidas las curvas de distribución granulométrica para cada material (Figura 1). El material más fino resultó ser la caliza, seguida por las tobas zeolitizadas calcinadas a $650 \text{ }^\circ\text{C}$, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ y $500 \text{ }^\circ\text{C}$ y por la toba zeolitizada natural, con valores de tamaño medio de partícula de 28,21; 55,92; 57,16; 62,19 y $80,16 \text{ } \mu\text{m}$, respectivamente.

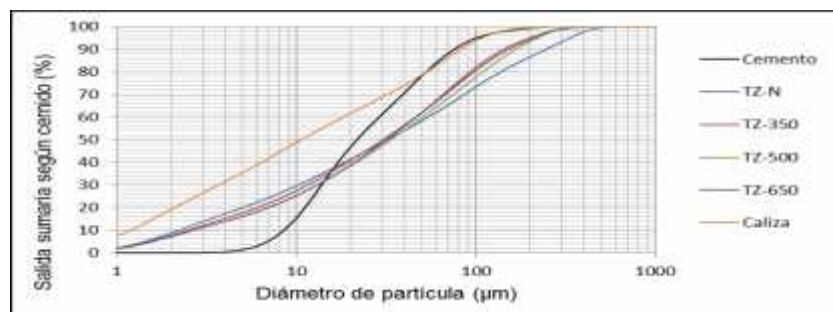


Figura 1. Curvas granulométricas de los materiales.

El analizador HORIBA LA-910 también determinó la superficie específica de los materiales; con resultados de 17 217; 8 535,9; 7 923; 7 435,3 y $7 499,4 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$

para la caliza, la toba zeolitizada natural y la toba zeolitizada calcinada a 350 °C, 500 °C y 650 °C, respectivamente. La Figura 2 muestra la relación inversa que existe entre el tamaño de partícula y la superficie específica de los materiales calcinados.

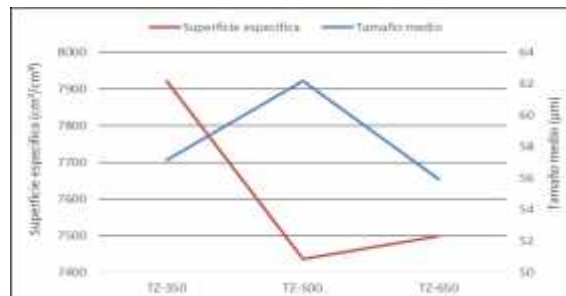


Figura 2. Relación entre el tamaño de partícula y la superficie específica de los productos de la calcinación de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés.

Composición química de la toba zeolitizada

La composición química de las tobas del yacimiento San Andrés, determinada mediante fluorescencia de rayos X (FRX), se presenta en la Tabla 2. Se aprecia que los compuestos que aparecen como constituyentes son: en mayores cantidades óxido de silicio y óxido de aluminio, con composición media el óxido de hierro III, óxido de calcio y en menores cantidades óxidos de sodio, magnesio, potasio y manganeso; en el Anexo 3 se muestran los contenidos de los elementos trazas que presentan en estas tobas. La composición química determinada en esta investigación se corresponde con la obtenida por otros investigadores como Almenares (2011) y Tapia (2013).

Tabla 2. Composición química de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés

Compuesto químico	Contenido (%)
SiO ₂	64,29
Al ₂ O ₃	12,62
MnO	0,05
MgO	2,71
Na ₂ O	1,58
CaO	5,09
TiO ₂	0,47
P ₂ O ₅	0,08
K ₂ O	1,72
Fe ₂ O ₃	2,7
SO ₃	0,06
PPI	8,63

De acuerdo con su composición y localización en el diagrama SiO₂ vs Na₂O+K₂O la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés se clasifica como roca de composición dacítica

(Figura 3) y según algunas investigaciones (Ramachandran et al., 2002; Snellings, 2011) las rocas de composición dacítica son propensas a presentar buena actividad puzolánica.

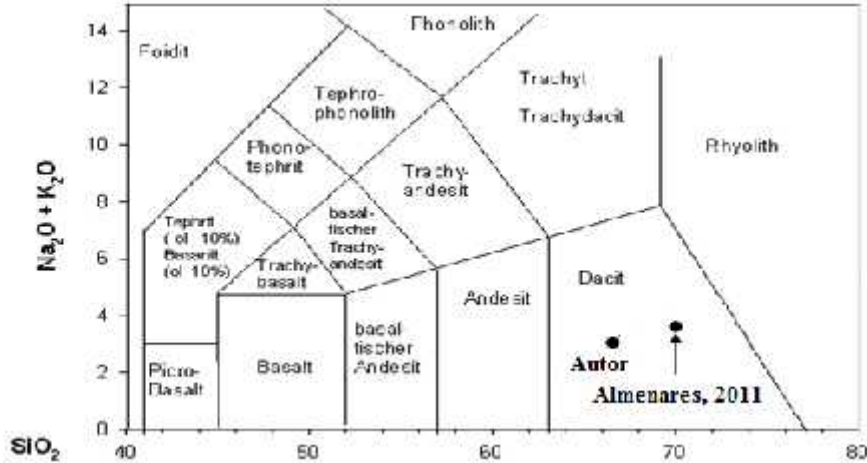


Figura 3. Ubicación de las tobas de San Andrés en el gráfico SiO₂ vs Na₂O+K₂O.

Como se puede observar la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ supera el 79 %, que comparado con el 70 % que establece como mínimo la norma NC TS 528:2007 para las puzolanas naturales en Cuba, es un indicador preliminar de reactividad de estas tobas. Estas tobas presentan un carácter ácido, con un contenido de SiO₂ alrededor de 65 %. El concentración del 5,09 % de CaO puede estar dada por la presencia de fases minerales de zeolitas ricas en calcio, además de plagioclasas cálcicas y calcita. En el diagrama ternario de los materiales cementicios suplementarios (MCS), confeccionado por Snellings (2011), estas tobas se ubican dentro del campo de las puzolanas de origen volcánico (Figura 4).

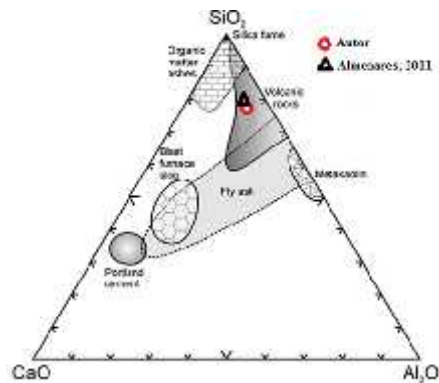


Figura 4. Diagrama ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ que agrupa la composición química (%) de los principales MCS (Fuente: Snellings (2011), modificado por el autor).

Composición mineralógica de la toba zeolitizada

En la Tabla 3 se muestran los porcentajes de la matriz vítrea más el contenido de zeolita, así como el contenido de arcilla y las principales fases mineralógicas cristalinas encontradas. Se observa que las tobas de San Andrés poseen buenas características reflejadas en su alto contenido de minerales del grupo de las zeolitas y fase vítrea y su bajo contenido de minerales arcillosos.

Tabla 3. Composición mineralógica de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés

Matriz vítrea + fases de zeolitas (%)	Contenido de arcilla (%)	Principales fases cristalinas
56 – 92	8 – 10	Clinoptilolita-heulandita, mordenita, cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, albita y anortita.

Los componentes cristalinos mayoritarios están determinados, principalmente, por clinoptilolita-heulandita y mordenita; en menores cantidades se encuentra cuarzo, montmorillonita, hematita, calcita, anortita y albita, lo que corrobora los resultados de los análisis químicos. Se ha reportado que las fases cristalinas no poseen actividad puzolánica (Odler, 2000), sin embargo, aquellas que se encuentran en un estado metaestable pueden presentar una actividad puzolánica moderada (Valdéz, Das & Rivera, 2004), como es el caso de la albita y la anortita, las cuales pueden presentarse con cierta alteración. Rabilero (2005) plantea que es importante la posibilidad, por lo menos teóricamente, de que algunos feldespatos alcalinos de muy baja cristalización puedan presentar determinada actividad puzolánica, acentuada por una molienda intensa y efectiva que dé lugar a un producto de elevada superficie específica. La presencia de calcita puede favorecer la hidraulicidad de las muestras.

Dentro de los minerales de las tobas zeolitizadas las fases de mayor potencial de reactividad, además del vidrio volcánico, son las fases zeolíticas; esto está dado por su estructura cristalina muy abierta y marcadamente desordenada, con una elevada porosidad interna (Rabilero, 2005).

Resistencias mecánicas de los morteros

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones de cementos, morteros y hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente

se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción del mortero (Almenares, 2011). A continuación son presentados los resultados de los ensayos de resistencia a la flexotracción y a la compresión realizados a los morteros.

Resistencia a la flexotracción

Las resistencias a la flexotracción de los morteros analizados, hasta las edades en que se practicaron los ensayos, nunca llegan a superar la del patrón. El mejor resultado, en términos absolutos, lo obtuvo el mortero preparado con toba zeolitizada calcinada a 650 °C, que alcanzó valores de 0,62 MPa y 1,03 MPa a los 7 y 28 días, respectivamente. Las resistencias más bajas fueron alcanzadas por el mortero preparado con toba zeolitizada calcinada a 500 °C para el caso de los análisis a 7 días y para el mortero preparado con toba calcinada a 350 °C para los análisis a los 28 días.

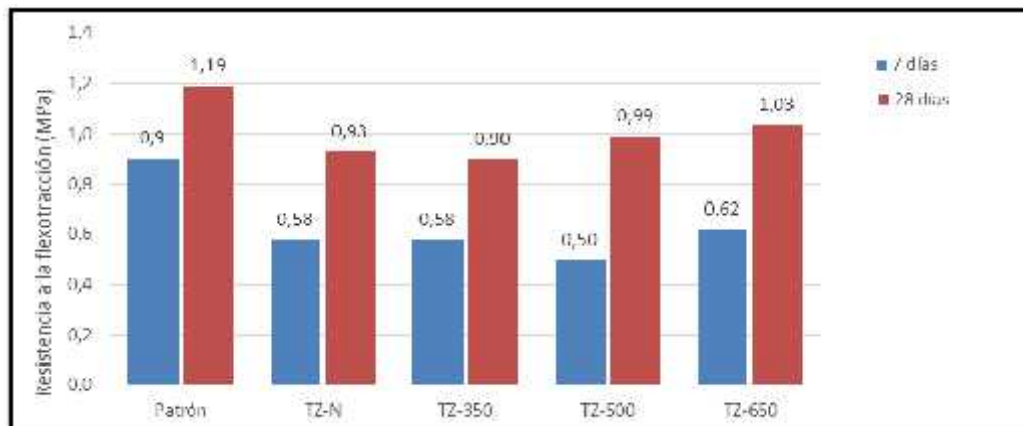


Figura 5. Resistencia a la flexotracción de los morteros.

La resistencia a la flexotracción de todos los morteros a los 28 días es superior a la de los 7 días; el mayor incremento, que fue de 0,49 MPa, lo percibió el mortero elaborado con toba calcinada a 500 °C; mientras que la mezcla que se preparó con la toba calcinada a 350 °C fue la que menos incrementó su resistencia, con una diferencia de 0,32 MPa entre los 7 y 28 días.

Resistencia a la compresión

Todos los morteros muestran incrementos en su resistencia a la compresión para el período entre los 7 y 28 días; el mayor aumento fue de 9,36 MPa y lo obtuvo el mortero preparado con toba zeolitizada calcinada a 650 °C; mientras que el menor

incremento, que fue de 7,73 MPa, fue logrado por el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350 °C.

A los 7 días el mejor comportamiento lo obtuvo el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350 °C, con un valor de resistencia a la compresión de 21,95 MPa; mientras que el que logró la menor resistencia, con un valor de 20,13 MPa, fue el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 500 °C. La mejor resistencia a los 28 días, lograda por el mortero elaborado con toba zeolitizada calcinada a 350 °C, fue de 29,68 MPa; mientras que el de peor resultado fue el mortero de toba zeolitizada natural con una resistencia de 29,30 MPa.

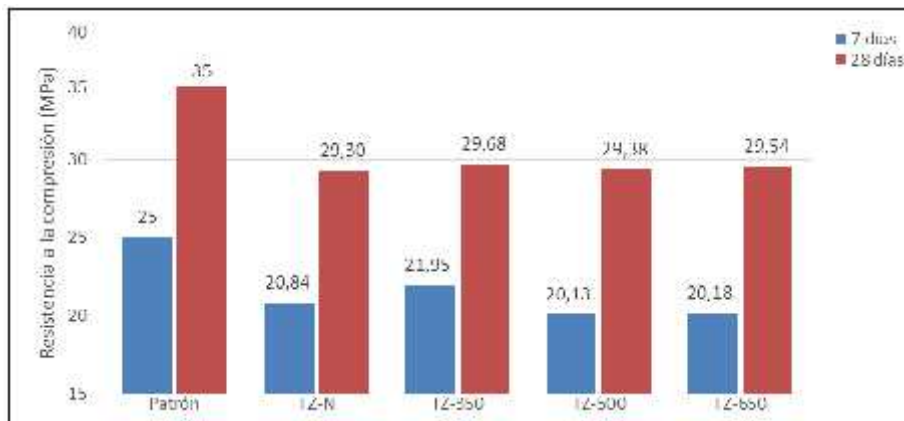


Figura 6. Resistencia a la compresión de los morteros.

Las relaciones entre la resistencia a la compresión lograda a edades tempranas (7 días), la superficie específica y la temperatura de activación del material puzolánico son puestas en evidencia en la Figura 7. A pesar de una reducción de la superficie específica del material puzolánico, la resistencia a la compresión a los días días ha aumentado, por lo que en este intervalo el efecto de la activación térmica es preponderante al efecto que genera la reducción de la superficie específica. Para el intervalo entre 350 °C y 500 °C la mayor influencia es ejercida por el factor superficie específica, porque su disminución, a pesar del aumento de la temperatura de activación, genera una reducción de la resistencia a la compresión del mortero. El intervalo de 500 °C a 650 °C muestra un incremento de la resistencia a la compresión causado por el aumento de la superficie específica y de la temperatura de activación.

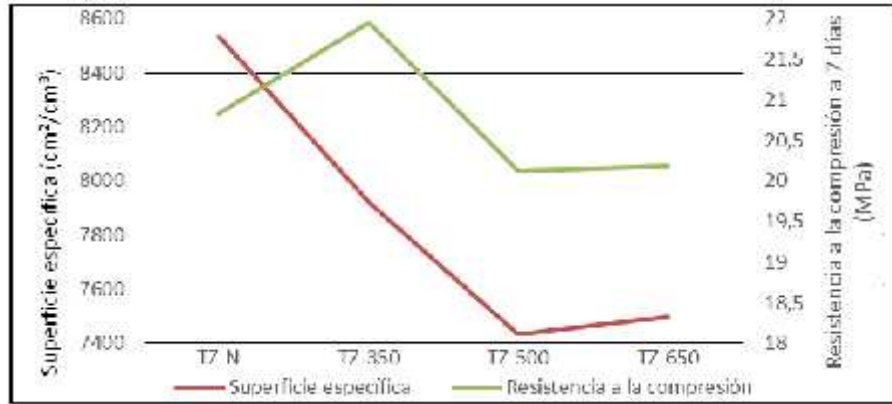


Figura 7. Influencia de la superficie específica sobre la resistencia a la compresión a los 7 días.

Índice de actividad puzolánica

Los resultados de la determinación del índice de actividad resistente muestran que todos los morteros superan el 75 % establecido por la norma cubana NC TS 527:2011, por lo que puede considerarse que la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación, aquí analizados, tienen buena reactividad en el aglomerante ternario cemento Portland–toba zeolitizada-caliza y, por lo tanto, son poseedores de propiedades puzolánicas.

El material con el mejor comportamiento fue la toba zeolitizada calcinada a 350 °C, que alcanzó índices de 87,80 % y 84,79 % a 7 y 28 días, respectivamente; este resultado puede tener como causa el hecho de que de los materiales calcinados este fue el que tuvo la mayor superficie específica, lo que pudo favorecerle en la formación de una mayor cantidad de silicatos de calcio hidratados a temprana edad. Por otro lado, los materiales con resultados más reservados fueron la toba calcinada a 500 °C a los 7 días, con un índice de actividad de 80,50 % y la toba zeolitizada natural a los 28 días con índice igual a 83,70 %.

Tabla 4. Índice de la actividad puzolánica de la toba zeolitizada natural y de los productos de su calcinación

Morteros	IAR (%)	
	7 días	28 días
TZ-N	83,38	83,70
TZ-350	87,80	84,79
TZ-500	80,50	83,93
TZ-650	80,72	84,39

Perspectivas de utilización de los aglomerantes cemento Portland–toba zeolitizada–caliza

Los aglomerantes a base de cemento Portland–toba zeolitizada–caliza desarrollados a partir de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación a 350 °C, 500 °C y 650 °C presentan propiedades superiores, en cuanto a resistencia mecánica a la compresión, que las exigidas a los cementos PP-25 y PZ-35. A esto hay que agregar el hecho de que en la elaboración de los aglomerantes se sustituye el 50 % del cemento Portland, mientras que en los aglomerantes PP-25 y PZ-25 las mayores sustituciones que pueden hacerse, según la norma cubana NC 96: 2011, son del 20 % y el 35 %, respectivamente.

Tabla 5. Resistencia a la compresión a 28 días de los morteros normados y de los desarrollados en la investigación (Fuente: NC 175: 2002 con modificación del autor)

Tipos de morteros	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Adherencia a los 28 días (MPa)
I	2,4	0,15 ± 0,005
II	3,5	0,25 ± 0,005
III	5,2	0,40 ± 0,005
IV	8,9	0,50 ± 0,005
V	12,4	0,65 ± 0,005
TZ-N	29,30	-
TZ-350	29,68	-
TZ-500	29,38	-
TZ-650	29,54	-

La Tabla 5 permite comparar los requisitos de resistencia a la compresión a los 28 días que impone la norma cubana NC 175: 2002 a los tipos de morteros y los valores alcanzados por los morteros desarrollados en esta investigación. Según estos requerimientos, todos los morteros desarrollados en este estudio se comportan mejor que todos los morteros normados. A pesar de estos alentadores resultados, la implementación de estos morteros en las funciones que cumplen los morteros normados (Tabla 6) solo puede ser recomendada después de analizar otras propiedades como la adherencia a los 28 días y la retención de agua.

Tabla 6. Utilizaciones de los morteros de colocación (Fuente: NC 175: 2002)

Lugar de colocación		Resistencia a la compresión a 28 días (valor mínimo)		Retención de agua (%) (valor mínimo)	
		Recomendada	Alternativa		
Exterior	Sobre el nivel del terreno	Muro portante	III	IV-V	90
		Muro no portante	I	II-III	
		Antepecho	III	IV-V	
	Bajo el nivel del terreno	Muro de fundición	V	IV>V	90
		Muro de contención			
	Pavimentos, caminos, patios				
Interior	Muro portante	III	IV-V	90	
	Muro no portante	I	II-III	90	

Conclusiones

Los ensayos de resistencias mecánicas a los morteros y la determinación del índice de actividad puzolánica para la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los productos obtenidos mediante su calcinación permiten concluir que:

La sumatoria de los contenidos de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés supera el 75 %, lo que las hace químicamente aptas para ser empleadas como puzolanas.

El mortero que mejor comportamiento mecánico exhibió fue el elaborado con la toba zeolitizada calcinada a 350 °C; alcanzando valores de resistencia a la compresión de 21,95 MPa y 29,68 MPa a los 7 y 28 días, respectivamente. A pesar de esto, el mortero elaborado con la toba zeolitizada natural resultó ser el más económico y el más ecológico debido a que su elaboración requirió de un consumo energético menor y su resistencia a la compresión no dista mucho de la del mortero elaborado con la toba calcinada a 350 °C.

Tanto la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés como los productos de su calcinación a 350 °C, 500 °C y 650 °C lograron un índice de actividad puzolánica por encima del 75 %, lo que demuestra su aptitud para ser empleados como materiales puzolánicos y su viabilidad para la elaboración de aglomerantes de base cemento Portland-toba zeolitizada-caliza.

Los morteros confeccionados con aglomerantes a base de cemento Portland-toba zeolitizada-caliza a partir de la toba zeolitizada del yacimiento San Andrés y los

productos de su calcinación a 350 °C, 500 °C y 650 °C mostraron un comportamiento de su resistencia a la compresión superior al exigido a los cementos PP-25 y PZ-25.

Referencias bibliográficas

- ALMENARES, R. 2011: Perspectivas de utilización de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín como aditivo puzolánico. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- HIDALGO, C. E. 2014: Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de los yacimientos Guaramanao y San Andrés, para su utilización como aditivo puzolánico. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- HUMPHREYS, K. & Mahasenan, M. 2002: Toward a Sustainable Cement Industry: Climate Change. Substudy 8. World Business Council for Sustainable Development.
- MARTIRENA, J. F. 2014: Los materiales cementicios suplementarios. En: XXI Escuela internacional de verano en Ciencia y Tecnología de Materiales. 29 junio-12 julio. La Habana.
- NC/ CEMENTO HIDRÁULICO — MÉTODOS DE ENSAYO — EVALUACIÓN DE LAS PUZOLANAS. NC TS 5272013.
- NC/CTN 22. 2011: NC 96. Cemento con adición activa -especificaciones. 2^{da} ed. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
- NC/CTN 22. 2007: NC-TS 528. Cemento hidráulico-puzolanas-especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
- NC/CTN 37. 2002: NC 175. Morteros de albañilería -especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
- ODLER, I. 2000: Special Inorganic Cement. CRC Press. 150 p.
- PÉREZ, Y. 2011: Evaluación de tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción. Ciencia & Futuro 1(4): 41-51.

- POLL, L.; ALMENARES, R.; ROMERO, Y.; DÍAS, A. A.; LEYVA-RODRÍGUEZ, C. A. & MARTIRENA, J. 2016: Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta, Moa, Cuba. *Minería & Geología* 32(1): 15-27.
- RABILERO, A. C. 2005: Mineralogía de las puzolanas. En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GOCIENCIAS 2005. 5-8 abril. Memorias [CD-ROM]. La Habana, Cuba.
- RAMACHANDRAN, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J. & DELGADO, A. H. 2002: Handbook of thermal analysis of construction materials. William Andrew.
- SNELLINGS, R. 2011: Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites. Katholieke Universiteit Leuven, Groep Wetenschap & Technologie, Arenberg Doctoraatsschool, W. de Croylaan 6, 3001 Heverlee, België.
- TAPIA, M. E. 2003: Valoración de la gestión geominera ambiental en el yacimiento eolita San Andrés. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
- VALDEZ, P. L.; DAS, T. K. & RIVERA, R. 2004: Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. *Ciencia Uanl* 7(2): 190-195.