

Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of the Huaynaputina lapilli for its application in the cement industry

Rossibel Churata, Dr¹, Luis Alberto De La Cruz-Mamani, Ing¹, Yosheff Ortiz-Valdivia, Dr¹, Cesar Daniel Valdivia-Portugal, Mg², Jonathan Almirón, Dr², Belinda Chavez, Mg² and Maria Vargas, Mg³

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, rchurata@unsa.edu.pe, ldelacruzmam@unsa.edu.pe, yortizv@unsa.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María, Perú, cvaldiviap@ucsm.edu.pe, jalmiron@ucsm.edu.pe, bchavez@ucsm.edu.pe

³Universidad Continental, Perú, mvgargasv@continental.edu.pe

Abstract— A physicochemical characterization of the Huaynaputina volcanic lapilli was carried out using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Differential scanning calorimetry (DSC) and Thermogravimetric analysis (TA) techniques in order to evaluate its potential as a pozzolanic material. The results obtained demonstrated that the material complies with the requirements established in the ASTM C-618 standard. Compressive strength tests were performed on mortars with different lapilli dosages and grinding degrees. The results indicated that grinding significantly improves pozzolanic reactivity, allowing partial replacement of cement without compromising mechanical properties. These findings open new possibilities for the development of more sustainable cemented materials with lower environmental impact.

Keywords— Cement, Pozzolan, Lapilli, Pozzolan activity, Compressive strength

Caracterización y evaluación de la actividad puzolánica del lapilli del Huaynaputina para su aplicación en la industria cementera

Rossibel Churata, Dr¹, Luis Alberto De La Cruz-Mamani, Ing¹, Yosheff Ortiz-Valdivia, Dr¹, Cesar Daniel Valdivia-Portugal, Mg², Jonathan Almirón, Dr², Belinda Chavez, Mg² y Maria Vargas, Mg³

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, rchurata@unsa.edu.pe, ldelaacruzmam@unsa.edu.pe, yortizv@unsa.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María, Perú, cvaldiviap@ucsm.edu.pe, jalmiron@ucsm.edu.pe, bchavez@ucsm.com

³Universidad Continental, Perú, mvargasv@continental.edu.pe

Resumen— Se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica del lapilli volcánico de Huaynaputina empleando técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB) y Análisis Termogravimétrico (AT) con el objetivo de evaluar su potencial como material puzolánico. Los resultados obtenidos demostraron que el material cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-618. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en morteros con diferentes dosificaciones de lapilli y grados de molienda. Los resultados indicaron que la molienda mejora significativamente la reactividad puzolánica, permitiendo la sustitución parcial de cemento sin comprometer las propiedades mecánicas. Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para el desarrollo de materiales cementados más sostenibles y con menor impacto ambiental.

Palabras clave— Cemento, Puzolana, Lapilli, Actividad Puzolánica, Resistencia a la compresión

I. INTRODUCCIÓN

La industria cementera es responsable de 6% al 8% de las emisiones de CO₂ en el mundo, siendo una industria altamente contaminante por la producción de Clinker, que requiere gran cantidad de calor y energía [1]. El cemento es un componente fundamental en la fabricación de hormigón y juega un papel crucial en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Desde la invención del cemento moderno en los siglos XIX, su producción ha crecido de manera constante, impulsada por el aumento de la población, la expansión de las zonas urbanas y la necesidad de desarrollar infraestructuras. En 2024, las emisiones de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles y la producción de cemento alcanzaron un récord de 37,400 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 0,8 % con respecto al año anterior [2],[3]. Se estima que, por cada tonelada de cemento producida, se liberan aproximadamente 0,8 toneladas de CO₂, lo que refuerza la necesidad de adoptar estrategias sostenibles en la industria de la construcción.

En este contexto, la utilización de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del cemento emerge como una alternativa viable para mitigar el impacto ambiental de la

producción cementera. En el sur del Perú, por ser una zona volcánica, cuenta con yacimientos ricos en sílice, alúmina y óxido férrico, componentes clave en materiales con alta reactividad puzolánica, tales como puzolanas naturales, ceniza volcánica, ignimbritas, piedra pómez, diatomitas, bentonitas, feldespatos, calizas y arcillas [4]. Dentro de estos materiales, el lapilli es un producto natural con potencial aplicación como aditivo cementicio.

El lapilli que es un material piroclástico de tamaño intermedio que se forma durante erupciones volcánicas explosivas. Su tamaño oscila entre 2 y 64 mm de diámetro, situándose entre las cenizas volcánicas (<2 mm) y las bombas volcánicas (>64 mm). Puede estar compuesto por fragmentos de lava solidificada, escoria, pómez o vidrio volcánico; dependiendo de su composición, por un lado, lapilli puede ser denso con fragmentos de lava solidificada o escoria, generalmente más pesados y, por otro lado, lapilli puede ser pómez que es de baja densidad, altamente poroso y de origen vesicular [5].

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el potencial de lapilli como material puzolánico como reemplazo parcial del cemento en la industria de la construcción, con el fin de reducir la huella de carbono asociada a su producción. Para ello, se analizará su actividad puzolánica bajo los parámetros establecidos en las normas ASTM C-311 (Métodos de prueba estándar para el muestreo y pruebas de cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en hormigón de cemento Portland) y ASTM C-618 (Especificación estándar para cenizas de carbón y puzolana natural crudo o calcinado para su uso en hormigón).

II. METODOLOGÍA

A. Materia prima

Las muestras de Lapilli volcánica son procedentes del distrito de Puquina, ubicada en el volcán Huaynaputina a 65 kilómetros al noreste de la ciudad de Moquegua, tal como se observa la Fig. 1, también se utilizó cemento tipo I ASTM C-

150 (Especificación estándar para cemento Portland), Arena calibrada ASTM C-778 (Especificación estándar para arena estándar) y agua.



Fig. 1 Ubicación de Lapilli volcánica.

B. Acondicionamiento de materia prima.

Las muestras de Lapilli volcánica fueron tamizadas por una malla número #10 con un tamaño de abertura de 2 mm para luego ser secadas en una mufla a 110°C durante 24 horas. Posteriormente fueron molidas para obtener tres granulometrías distintas:

Granulometría 1: Molienda en un equipo de abrasión marca TREMAD III para obtener un tamaño pasante malla #100 (0.150mm). Esta muestra tiene un % de retenido en la malla #400 (38 µm) del 37%

Granulometría 2: Molienda en un equipo de abrasión marca TREMAD III para obtener un tamaño pasante malla #100 (0.150mm) y adicionalmente se molió en un molino planetario marca RETSCH por un tiempo de 10 min a 550 RPM. Esta muestra tiene un % de retenido en la malla #400 (38 µm) del 11%.

Granulometría 3 Molienda en un equipo de abrasión marca TREMAD III para obtener un tamaño pasante malla #100 (0.150mm) y luego se realizó una segunda molienda en un molino planetario marca RETSCH por un tiempo de 20 min a 550 RPM. Esta muestra tiene un % de retenido en la malla #400 (38 µm) del 8%.

C. Caracterización de Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (FRX)

El proceso de análisis de DRX, se utilizó para identificar las diferentes fases cristalinas de las muestras de lapilli inicial. Este ensayo se efectuó en un difractómetro de rayos X de polvo de sobremesa Rigaku MiniFlex 600 en el rango 2θ de 3-90 ° y para la identificación se utilizó Crystallography Open Database (COD).

Los análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) se realizaron para determinar la composición elemental de las muestras de lapilli, identificando y cuantificando los elementos

presentes. Para ello, se utilizó un espectrómetro de dispersión de energía de alta resolución Rigaku NEX QC+ QuantEZ.

D. Índice de Actividad Puzolánica ASTM C-311 (IAP)

Se prepararon mezclas con las tres granulometrías distintas basadas en la norma ASTM C-311 “Métodos de prueba estándar para muestreo y prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en concreto de cemento Portland”, en la cual indica que se hace un reemplazo de 20% de material cementante por la adición puzolánica (lapilli volcánico), se hace el empleo de una arena silíceica calibrada bajo norma ASTM C-778 “Especificación estándar para arena estándar”. Las dosificaciones exactas para cada mezcla se presentan en la Tabla I. El procedimiento de elaboración y ensayo de las probetas están estipulados en la norma ASTM C-109. Los tiempos de evaluación son a 7 y 28 días de curado.

TABLA I
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES SEGÚN ASTM C-311

Materiales	Patrón	Gran. 1	Gran. 2	Gran. 3
	0%	20%	20%	20%
Cemento	500	400	400	400
Arena graduada	1375	1375	1375	1375
Agua	242	242	242	242
Lapilli Volcanica	0	100	100	100

E. Análisis por calorimetría Diferencial de Barrido (CDB) y Análisis termogravimétrico (AT)

Los análisis CDB-AT proporcionan información simultánea sobre las transiciones térmicas y los cambios de masa de las muestras en función de la temperatura, lo que permite estudiar el comportamiento de los materiales ante cambios de temperatura de manera integral. El equipo utilizado es de la marca Discovery SDT 650 con una velocidad de calentamiento de 10°C·min⁻¹, con atmósfera de N₂ a 50 ml·min⁻¹ en el rango de temperatura de 20-550 °C.

Se prepararon pastas de cemento con la incorporación de lapilli volcánico, utilizando una relación agua/cemento (a/c) de 0,485. En cada mezcla, se reemplazó el 20 % del cemento del diseño total por lapilli volcánico. La mezcla obtenida se vertió en moldes con un diámetro de 25 mm y un espesor de 4,5 mm. Tras el moldeo, las muestras fueron curadas en una cámara de curado a 23,0 °C ± 2,0 °C durante un período de 20 a 24 horas. Posteriormente, se sometieron a curado en agua hasta alcanzar las edades de 3, 7 y 28 días, pasado el tiempo se retira las muestras y se somete aun secado previo y posterior molienda en un mortero de ágata. A continuación, el material se colocó en crisoles de porcelana y se sometió a un proceso de secado para detener la hidratación. Para ello, se aplicó el método descrito en la norma ASTM D-4643, que establece el procedimiento para la determinación del contenido de agua en suelos y rocas mediante calentamiento en horno de microondas.

Una vez completado el secado, la muestra fue enfriada a temperatura ambiente durante 30 minutos. Posteriormente, se procedió a su pesaje y se transfirió al equipo CDT-AT (Discovery SDT 650) para el análisis termogravimétrico. Para este procedimiento, se emplearon recipientes de alúmina de 90 µl, con un rango de temperatura máxima de 1600 °C. Las dosificaciones exactas para cada mezcla se presentan en la Tabla II.

TABLA II
DOSIFICACIONES DE PASTAS DE CEMENTO Y LAPILLI CON UNA RELACIÓN A/C=0.485.

Materiales	Patrón	Gran. 1	Gran. 2	Gran. 3
	0%	20%	20%	20%
Cemento	300	240	240	240
Agua	145	145	145	145
Lapilli Volcanica	0	60	60	60

F. Preparación de mezclas con diferentes dosificaciones de lapilli

El reemplazo del cemento tipo I por lapilli volcánico se realizó en porcentajes de 0%, 10%, 20% y 30%, siguiendo las normas ASTM C31 (Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra) y ASTM C778. Las dosificaciones exactas para cada mezcla se presentan en la Tabla III.

Los especímenes se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C-109 (Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros hidráulicos de cemento) y se curaron a 23°C durante 7 y 28 días. Posteriormente, se realizaron los ensayos de compresión.

TABLA III
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES PARA DIFERENTES MEZCLAS

Materiales	Patrón	Reemplazo del cemento por lapilli a las granulometrías 1, 2 y 3		
	0%	10%	20%	30%
Cemento	500	450	400	350
Arena graduada	1375	1375	1375	1375
Agua	242	242	242	242
Lapilli Volcanica	0	50	100	150

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Resultados de FRX y DRX

Los resultados de la composición química de la lapilli volcánica, presentados en la Tabla IV, indican un contenido de SiO₂ del 72.7%, Al₂O₃ del 15.8% y CaO del 2.97% característica elemental de las puzolanas; esta afirmación coincide con las conclusiones investigadas por muchos autores, como Christiansen y Dyamond [6]. Estos valores, particularmente la elevada proporción de SiO₂, sugieren una alta reactividad puzolánica [2]. Otro aspecto que destacar es el contenido de compuestos alcalinos como K₂O, con respecto a la tierra alcalina CaO y MgO [7]. Al sumar los porcentajes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, se obtiene un valor superior al 70%

requerido por la norma ASTM C-618 para adiciones de tipo N, lo cual confirma el potencial puzolánico de este material.

TABLA IV
RESULTADOS DE COMPOSICIÓN DE ÓXIDOS POR FRX DE LAPILLI.

Muestra: Lapilli volcánica	
Componente	Resultado (%)
SiO ₂	72.70
Al ₂ O ₃	15.80
K ₂ O	3.98
Fe ₂ O ₃	3.16
CaO	2.97
TiO ₂	0.60
SO ₃	0.20
Cl	0.12
MnO	0.10
V ₂ O ₅	0.07
BaO	0.07
SrO	0.07
NiO	0.02
ZrO ₂	0.02
CuO	0.01
ZnO	0.01
Rb ₂ O	0.10
PbO	0.00
Au ₂ O	0.00

Mientras que la Tabla V muestra los resultados de DRX, indicando la presencia en mayor cantidad de Corindon con un 38% seguido de Albite con un 28%.

TABLA V
RESULTADOS DE FASES EN LA MUESTRA LAPILLI VOLCÁNICA POR DRX.

Nombre de fase	Contenido
Corundum	38.00%
Albite	28.00%
Magnetite	9.00%
Stellerite	7.30%
Quartz	7.00%
Hornblende	6.80%
Phlogopite	3.80%
Analcime	0.11%

B. Resultados de actividad puzolánica

La Fig. 2 muestra la reactividad puzolánica (%) a los 7 días de diferentes granulometrías de lapilli en comparación con el Cemento Tipo I y el criterio mínimo establecido por la norma ASTM C618 (75 %), representado por la línea roja. La probeta patrón, sin reemplazo de cemento por lapilli, alcanzó una resistencia a la compresión de 266,53 kg·cm⁻² a los 7 días. Al sustituir el 20 % del cemento con lapilli en diferentes granulometrías, se observa lo siguiente: CV-Granulometría 1 (224,97 kg·cm⁻²): Presenta una reactividad puzolánica superior al 75 % del valor del cemento Tipo I, cumpliendo con la norma ASTM C618; CV-Granulometría 2 (303,2 kg·cm⁻²): Muestra la

mayor reactividad puzolánica, superando el valor de referencia del Cemento Tipo I y demostrando un excelente desempeño mecánico y CV-Granulometría 3 ($281,27 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$): También supera el 75 % del valor del cemento Tipo I y se acerca a la resistencia obtenida con la granulometría 2.

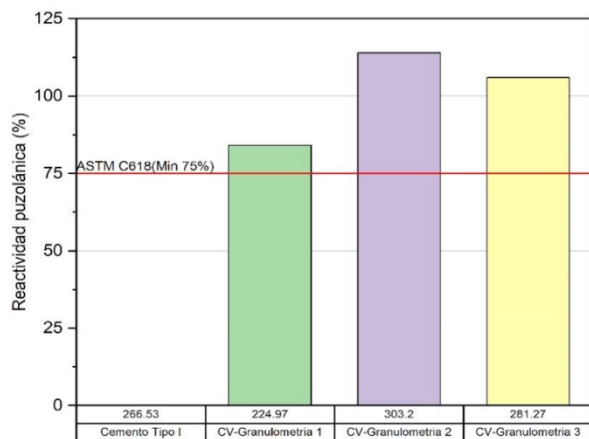


Fig. 2 Índice de actividad puzolánica a los 7 días.

La Fig. 3 muestra la reactividad puzolánica (%) a los 28 días de diferentes granulometrías de lapilli en comparación con el Cemento Tipo I y el criterio mínimo establecido por la norma ASTM C618 (75 %), representado por la línea roja. La probeta patrón, sin reemplazo de cemento por lapilli, alcanzó una resistencia a la compresión de $343 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ a los 28 días. Al sustituir el 20 % del cemento con lapilli en diferentes granulometrías, se observa lo siguiente: CV-Granulometría 1 ($290.73 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$): Presenta una reactividad puzolánica superior al 75 % del valor del cemento Tipo I, cumpliendo con la norma ASTM C618; CV-Granulometría 2 ($351.23 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$): También supera el 75 % del valor del cemento Tipo I y CV-Granulometría 3 ($413.07 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$): Muestra la mayor reactividad puzolánica, superando el valor de referencia del Cemento Tipo I y demostrando un excelente desempeño mecánico.

El análisis de los datos presentados en la Fig. 2 y Fig. 3, revela que el lapilli volcánico cumple ampliamente con los criterios de la norma ASTM C-618 para materiales puzolánicos. La molienda fina, especialmente a 550 RPM durante 10 y 20 minutos, favoreció una mayor superficie específica del material, lo que se tradujo en una reactividad superior al 75%. Por otro lado, el proceso de molienda en dos etapas optimizó aún más la reactividad, alcanzando un índice del 100% a los 28 días. En general, todas las granulometrías evaluadas cumplen con los requisitos de la norma ASTM C618, demostrando que el lapilli volcánico es un material viable para reemplazar parcialmente el cemento sin afectar significativamente la resistencia mecánica. Además, la granulometría 3 a los 28 días muestran el mejor rendimiento en términos de reactividad puzolánica, lo que sugiere que el tamaño de partícula juega un papel clave en la optimización de la actividad puzolánica del material.

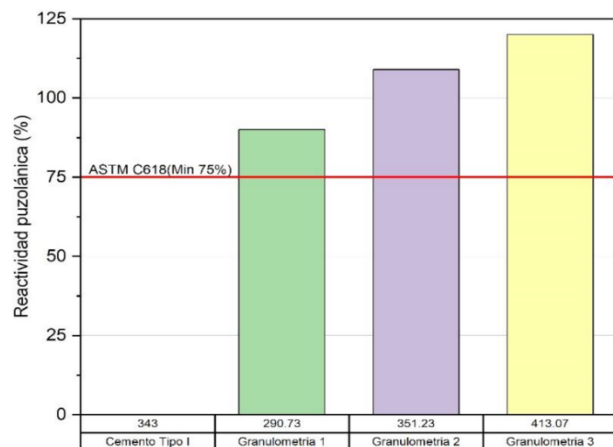


Fig. 3 Índice de actividad puzolánica a los 28 días.

C. Resultados de las pruebas CDB-AT

El análisis CDB-AT se empleó para estudiar la reacción entre el hidróxido de calcio y lapilli volcánica. Los resultados muestran una variación en los picos de CDB entre 430°C y 500°C , lo que indica una reacción entre el hidróxido de calcio y los silicatos presentes en el lapilli. Esta reacción conduce a la formación de silicatos de calcio, reduciendo el contenido de hidróxido de calcio en el sistema con el tiempo de curado. Los silicatos de calcio son responsables de mejorar las propiedades mecánicas del cemento, como la resistencia a edades tempranas, y de aumentar su durabilidad frente a agentes externos.

Es así como en la Fig. 4 se pueden ver claramente 3 picos que se le atribuyen a 3 procesos, 1) denota un proceso de deshidratación de las fases de C-S-H (torberomita o fases de silicato de calcio hidratados) y geles de C-S-H, este fenómeno se da entre 100°C a 150°C , 2) se le atribuye a la deshidratación de la etringita, este se da entre 150°C a 200°C aproximadamente y finalmente el pico 3) le corresponde a la deshidroxilación de la portlandita o hidróxido de calcio.

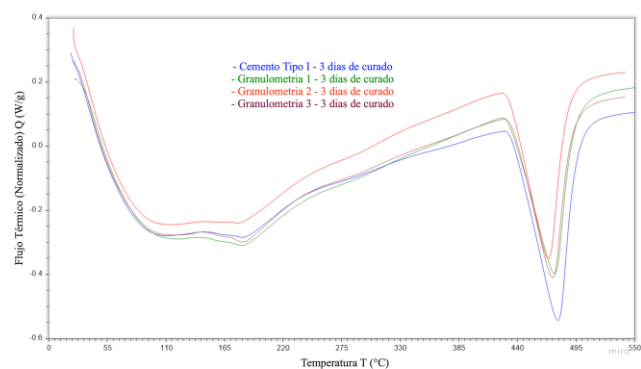


Fig. 4 Curvas agrupadas CDB de dosificaciones a 3 días de curado.

Según la Ref. [8] indica que en pruebas de DSC cerca de los 450°C se presenta un pico que se le atribuye al hidróxido de calcio. Así mismo, la Ref. [9] en su investigación titulada

“Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement” atribuyen un pico que se encuentra entre los 400°C a 550°C al hidróxido de calcio, pero en un proceso de deshidroxilación de este. Otros autores como [10] en sus estudios de evaluación de actividad puzolánica le atribuyen el pico formado entre 450°C a 500°C a la descomposición del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

El AT se utilizó para estudiar la deshidroxilación del hidróxido de calcio. Las curvas de AT muestran una pérdida de masa significativa en el rango de temperaturas entre 440°C y 495°C, correspondiente a la descomposición del hidróxido de calcio, tal como se observa en la Fig. 5 (a los 3 días de curado). Para una mayor precisión en la determinación de los límites de este proceso, se analizaron las curvas derivadas (DTG), las cuales permitieron identificar con mayor claridad los picos asociados a la deshidroxilación.

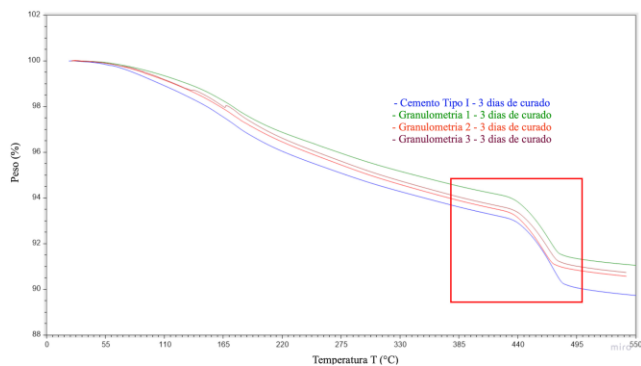


Fig. 5 Curvas de AT a 3 días de curado de pastas.

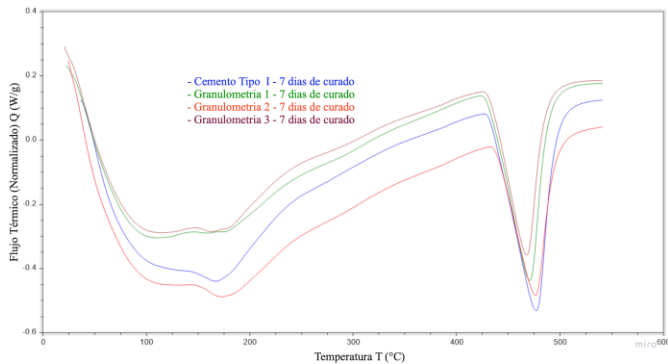


Fig. 6 Curvas de CDB a 7 días de curado de pastas

Las termogramas de la Fig. 6 (a los 7 días de curado) muestran una disminución progresiva en la intensidad de los picos asociados a la portlandita (C-SH) en las muestras con adiciones de lapilli, lo que indica una menor cantidad de este compuesto en comparación con las muestras de referencia. Esta disminución se debe a la mayor reactividad de las mezclas con lapilli, que consume el hidróxido de calcio en la formación de productos de hidratación más estables.

Los análisis de AT, mostrados en la Fig. 7 corroboran estos resultados, mostrando una reducción en la pérdida de masa en

el rango de temperaturas entre 400°C y 500°C, correspondiente a la deshidratación de la portlandita. La disminución en la pérdida de masa indica una menor cantidad de hidróxido de calcio en las muestras con adiciones de lapilli, lo cual es una evidencia de la reacción puzolánica.

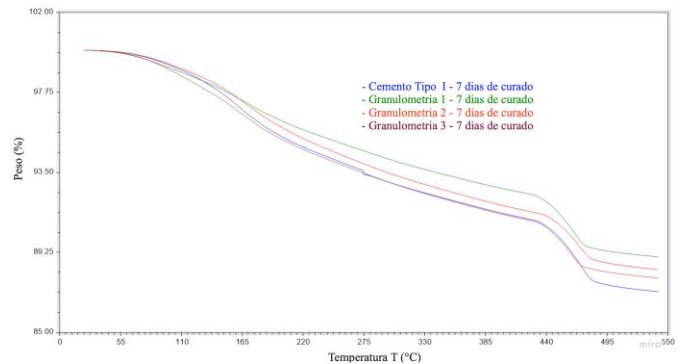


Fig. 7 Curvas de AT a 7 días de curado de pastas

La Fig. 6 y 8 (a los 28 días de curado) muestra una clara diferencia entre la curva de CDB correspondiente a la muestra patrón (curva azul) y la curva de la muestra con un 20% de adición de lapilli (curva marrón). La disminución en la intensidad del pico exotérmico asociado a la deshidratación de la portlandita en la muestra con adición indica una menor cantidad de este compuesto. Esta reducción se debe a la reacción puzolánica, que consume el hidróxido de calcio en la formación de productos de hidratación más estables.

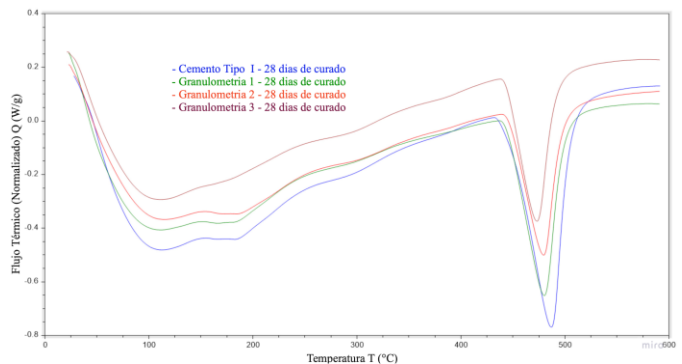


Fig. 8 Curvas de CDB a 28 días de curado de pastas

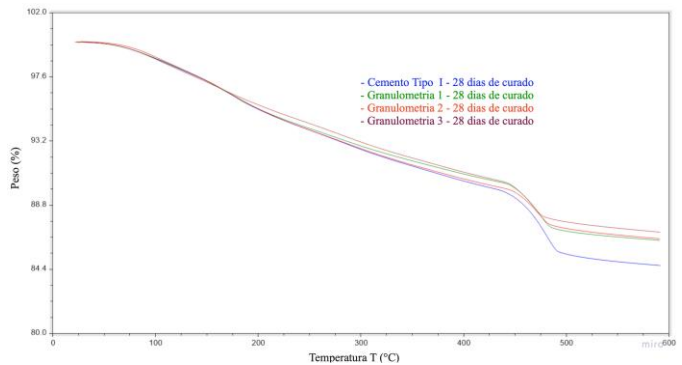


Fig. 9 Curvas de AT a 28 días de curado de pastas

D. Resultados del ensayo de compresión con diferentes dosificaciones de lapilli

Los resultados del ensayo de compresión mostrados en la Tabla VI a 7 días, muestra una tendencia positiva. Las muestras con granulometría 2 y 3 superan significativamente el valor mínimo de resistencia establecido por la norma ASTM C-150 ($194 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$), mientras que las muestras con granulometría 1 no cumplen con este requisito. Estos resultados sugieren que la molienda fina mejora las propiedades mecánicas del material compuesto. Mientras que los resultados de las pruebas a 28 días muestran que las muestras con granulometría 2 (con % de retenido en la malla #400 ($38 \mu\text{m}$) del 11%) y 3 (con % de retenido en la malla #400 ($38 \mu\text{m}$) del 8%) superan ampliamente el valor mínimo de resistencia establecido por la norma ASTM C-150 ($286 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$), lo que confirma la efectividad de la molienda en el desarrollo de las propiedades mecánicas. Por el contrario, la muestra con granulometría 1 (con % de retenido en la malla #400 ($38 \mu\text{m}$) del 37%) no cumple con este requisito debido a la menor reactividad de la partícula, atribuible al mayor porcentaje de lapilli sin tratamiento.

Además, se observó que un reemplazo del 20% de cemento por lapilli volcánico resultó en un aumento significativo de la resistencia a la compresión [6].

TABLA VI
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES GRANULOMETRÍAS.

Granulometría	Dosificación de Lapilli	7 días	28 días
		Resistencia $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	
Patrón (Cemento Tipo I)	0%	266.53	343.20
Granulometría 1	10%	158.20	292.33
	20%	224.97	290.70
	30%	75.67	114.70
Granulometría 2	10%	224.97	313.13
	20%	303.20	351.23
	30%	286.07	337.20
Granulometría 3	10%	320.17	385.67
	20%	281.27	413.07
	30%	249.70	366.73

IV. CONCLUSIONES

La caracterización física y química de lapilli volcánico, junto con los ensayos de reactividad puzolánica, permitieron determinar que este material cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-618. La molienda fina, especialmente a 550 RPM durante 20 minutos, resultó en una mayor superficie específica del material, lo que se tradujo en una reactividad puzolánica significativamente superior.

Los análisis termogravimétricos (AT) confirmaron la formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) producto de la reacción puzolánica y cuantificaron la disminución del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), evidenciada por la reducción del pico endotérmico a 450°C en las curvas CDB. Los ensayos mecánicos demostraron que la adición del 20% de lapilli molido a 550 RPM optimiza las propiedades del compuesto, alcanzando resistencias superiores a las del cemento puro ($413 \text{ vs. } 343 \text{ kg}/\text{cm}^2$ a 28 días). Este comportamiento se atribuye a la mayor superficie específica de las partículas finas ($\leq 38 \mu\text{m}$), que incrementan el contacto con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y aceleran la formación de C-S-H, fase clave para la resistencia. La composición química del lapilli ($72.7\% \text{ SiO}_2 + 15.8\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, por FRX/DRX) valida su idoneidad como puzolana, cumpliendo con los requisitos de la norma ASTM C-618.

REFERENCIA

- [1] Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma, P. C. Thapliyal, and L. P. Singh, "Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector," *J Clean Prod*, vol. 417, p. 137466, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.137466.
- [2] A. G. Valencia-Huaman *et al.*, "Obtaining Zeolites from Natural Materials of Volcanic Origin for Application in Catalytic Pyrolysis for the Sustainable Chemical Recycling of Polymers," *Sustainability*, vol. 16, no. 14, p. 5910, Jul. 2024, doi: 10.3390/su16145910.
- [3] N. Calderón, M. Vargas, J. Almirón, A. Bautista, F. Velasco, and D. Tupayachy-Quispe, "Influence of the Activating Solution and Aggregates in the Physical and Mechanical Properties of Volcanic Ash Based Geopolymer Mortars," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1054, no. 1, p. 012003, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1054/1/012003.
- [4] T. A. Fode, Y. A. C. Jande, and T. Kivevele, "Effect of Natural Pozzolana on Physical and Mechanical Properties of Concrete," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, no. 1, p. 3356641, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/3356641.
- [5] P. Francis and C. Oppenheimer, "Magma - the hot stuff," *Volcanoes*, pp. 93–106, 2004, Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://global.oup.com/academic/product/volcanoes-9780199254699>
- [6] Mary U. Christiansen and Benjamin Z. Dymond, "Effect of Composition on Performance of Ground Glass Pozzolan," *ACI Mater J*, vol. 117, no. 4, Jul. 2020, doi: 10.14359/51716749.
- [7] J. L. Costafreda, D. A. Martín, L. Presa, and J. L. Parra, "Altered Volcanic Tuffs from Los Frailes Caldera. A Study of Their Pozzolanic Properties," *Molecules*, vol. 26, no. 17, p. 5348, Sep. 2021, doi: 10.3390/molecules26175348.
- [8] K. N. Tamayo, "Diseño Y Control De Mezclas De Concreto - Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff & William C. Panarese (1ra Edición)," *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, p. 452, 2004, Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/33383752/Dise%C3%B1o_Y_Control_De_Mezclas_De_Concreto_Steven_H_Kosmatka_Beatriz_Kerkhoff_and_William_C_Panarese_1ra_Edici%C3%B3n
- [9] A. Lachemet *et al.*, "Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste produced from two different cement plants," 2009, doi: 10.3303/CET0917120.
- [10] J. Torres Agredo, E. A. Baquero Velasco, and A. R. Silva, "Evaluación De La Actividad Puzolánica De Un Residuo De La Industria Del Petróleo," *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, ISSN 0012-7353, Vol. 76, No. 158, 2009, págs. 49-53, vol. 76, no. 158, pp. 49–53, 2009, Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7591535&info=resumen&idioma=ENG>