

VALORACIÓN Y EFECTOS PUZOLÁNICOS DEL MATERIAL VOLCÁNICO DEL PURACÉ

 DIANA MARCELA BURGOS GALINDO ¹
LUISA MARÍA CARDONA RAMÍREZ ²
MARISOL GORDILLO SUÁREZ ³
SILVIO DELVASTO ARJONA ⁴

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados experimentales de caracterización y evaluación puzolánica del material volcánico del Puracé (MVP). El MVP fue analizado mediante microscopía electrónica de barrido, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, petrografía de secciones delgadas, análisis termo-gravimétricos, entre otros. La reactividad puzolánica fue evaluada por medio del Índice de Actividad Puzolánica y el ensayo de Frattini. Además, se evaluó el efecto de la incorporación del MVP en la resistencia a compresión de morteros donde el cemento Portland se reemplazó por MVP en un rango del 0-40 %. Los resultados demostraron que el MVP presentó todas las características para ser considerado una puzolana natural y su porcentaje óptimo de incorporación como puzolana en reemplazo del cemento es del 10 %, pero el diseño demostró que puede incorporarse hasta un 20 % con una pequeña desviación en la resistencia media reportada por el diseño.

PALABRAS CLAVE: morteros de cemento Portland; puzolana natural; material volcánico; actividad puzolánica.

EVALUATION AND POZZOLANIC EFFECTS OF THE PURACÉ VOLCANIC MATERIAL

ABSTRACT

This paper reports the results of a research where was evaluated the characteristics and pozzolanic reactivity of the Puracé volcanic material (PVM). This material was analyzed by scanning electron microscope, X-ray fluorescence, X-ray powder diffraction, thermal analysis, and petrographic study, among others. The ability of Puracé volcanic material as pozzolan was evaluated by the pozzolanic activity index and the Frattini test. Moreover, the investigation evaluates the effect of incorporating PVM on the compressive strength of mortars, where Portland cement was replaced by PVM in the range of 0 to 40%. The results showed that PVM presents characteristics to be considered a natural pozzolan and the experimental design indicated that the optimal amount of incorporation of this material is around 10% with respect to the cement content by weight. However this experimental design also showed that it is possible to incorporate up to 20% of PVM with a small deviation from the mean strength reported by the design.

KEYWORDS: Portland cement mortar; Natural pozzolan; Volcanic material; Pozzolanic activity.

- ¹ Ingeniero de materiales Universidad del Valle. PhD. en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de los Materiales Universidad del Valle. Grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC), Universidad del Valle.
- ² Ingeniera de materiales Universidad del Valle. Especialista en Gerencia de Proyectos Icesi. Grupo Materiales Compuestos (GMC), Universidad del Valle. Directora de Servicios de Ingeniería Proinmocon.
- ³ Licenciada en Estadística. MCs en Ingeniería. PhD. en Ingeniería de Materiales. Docente tiempo completo Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC) Universidad del Valle.
- ⁴ Ingeniero químico Universidad del Valle. MCs. en Ingeniería Civil y Gestión de Materiales. PhD. en Ingeniería de Nuevos Materiales y sus Tecnologías de Fabricación. Profesor titular de la Universidad del Valle. Grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC).



Autor de correspondencia: Burgos-Galindo, D.M. (Diana Marcela). Universidad del Valle: Cll. 13 No. 100-00. Edificio 349, Cali, Colombia. Tel: (+57) 2 3212270. Correo electrónico: diana.burgos@correounivalle.edu.co

Historia del artículo:

Artículo recibido: 29-I-2014 / Aprobado: 07-I-2015
Disponible online: 30 de junio de 2015
Discusión abierta hasta junio de 2016



AVALIAÇÃO E EFEITOS POZOLÂNICOS DO MATERIAL VOLCÂNICO DO PURACÉ

RESUMO

Neste artigo são apresentados os resultados experimentais de caracterização e avaliação pozolânica do material vulcânico do Puracé de (MVP). O MVP foi analisado por microscopia eletrônica de varredura, fluorescência de raios X, difração de raio-X, petrografia de cortes finos, análise termogravimétrica, entre outros. A reatividade pozolânica foi avaliada pelo índice de atividade pozolânica e o teste Frattini. Além disso, foi avaliado o efeito da incorporação do MVP na resistência a compressão das argamassas onde o cimento Portland foi substituído por MVP na gama de 0 a 40%. Os resultados mostraram que o MVP apresentou todas as características necessárias para ser considerada uma pozolana natural e a sua taxa ótima de incorporação como a pozolana em substituição do cimento é de 10%, mas a concepção provou que pode juntar-se a 20% com um pequeno desvio em relação à força média relatada por o design.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassas de cimento Portland; Pozolana natural; Material vulcânico; Atividade pozolânica.

1. INTRODUCCIÓN

Las puzolanas naturales se dividen en materiales de origen sedimentario y de origen volcánico, los últimos son el resultado de erupciones volcánicas y de acuerdo a la naturaleza de las explosiones y las condiciones de enfriamiento, se generan diferentes tipos de materiales volcánicos micro-porosos (fragmentos de vidrio volcánico, cenizas volcánicas y tobas volcánicas) compuestos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (Massazza, 1993). Este tipo de materiales han sido ampliamente empleados como sustitutos del cemento Portland en muchas aplicaciones debido a que se adaptan fácilmente a la producción del cemento especialmente en regiones donde existen grandes cantidades de depósitos volcánicos y donde la disponibilidad de otras puzolanas es muy limitada. Por otra parte, desde el punto de vista tecnológico el uso de los materiales volcánicos implica numerosas ventajas, tales como, la reducción de los costos de producción, la disminución de las emisiones de CO_2 a la atmosfera, la disminución de la permeabilidad y el incremento de la resistencia química frente a diferentes medios, aunque normalmente presentan una desventaja y es la disminución de las propiedades mecánicas a edades tempranas (Alp, *et al.*, 2009; Costafreda, Calvo, Parra, 2011; Hossain, Lachemi, 2004, 2006a, 2006b, 2007, 2010; Hossain, 2003, 2005, 2006; Jamshidi, Najimi, Pourkhorshidi, 2009; Kaid, Cyr, Julien, Khelafi, 2009; Morandi, Uliarte, Oliva, 2000; Ramezani pour, Samadian, Mahdikhani, 2012; Rodríguez, Uribe, 2002; Siad, Mesbah, Kamali, Khelafi, Moulli, 2010; Uzal, Turanlı, 2003).

La reactividad pozolánica de los Materiales Volcánicos se encuentra ligada a la estructura física de las partículas y al potencial para reaccionar y formar compuestos cementicios (Kirk, Zuleta, 2000), es decir que dependerá del contenido de fases reactivas como la sílice que reacciona con el Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación del cemento Portland produciendo silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que son fases estables, hidráulicas e insolubles (Rosell-Lam, Villar-Cociña, Frías, 2011). Diversas investigaciones confirman la idoneidad de los materiales de origen volcánico como remplazo del cemento en la producción de diferentes elementos de construcción (J. Costafreda, Calvo, 2009; Ozgunler, Ozgunler, 2011; Türkmenoğlu, Tankut, 2002). En Colombia existen numerosos depósitos volcánicos que pueden ser aprovechados en la producción de material cementicio. En este trabajo de investigación se presenta la caracterización y evaluación de la reactividad del material proveniente del volcán Puracé (no aprovechado hasta el presente) como puzolana natural. Se indica, además, el orden óptimo de incorporación de este material, de acuerdo a la resistencia a la compresión.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para el desarrollo experimental de este estudio se tomaron muestras de material volcánico del Puracé que se encuentra ubicado al occidente de Popayán en el departamento del Cauca. En la falda de este volcán se encuentra una mina de extracción de azufre, en la cual existen dos tipos de frentes de explotación

denominados frente activo y frente inerte, del primero se extrae azufre con una pureza de 99 %, mientras que el material del segundo frente es descartado, ya que este presenta un contenido de azufre inferior al 30 %, lo cual lo hace improductivo para la obtención del azufre, por lo que recibe el nombre de material inerte. No obstante, al ser un material de desecho con gran potencial, resulta muy importante su caracterización y posible aprovechamiento en otras aplicaciones. Por esta razón, se decidió utilizar dos de los frentes inertes para tomar muestras puntuales. Una vez recolectado, el material fue adecuado por medio de procesos de trituración para convertir las rocas en un material a granel, que posteriormente se pulverizó en un molino de discos y luego en un molino de bolas, obteniendo finalmente un tamaño promedio de partícula de 21 micrómetros.

2.2. Métodos de caracterización del material volcánico del Puracé

El material volcánico del Puracé (MVP) obtenido del proceso de molienda se caracterizó por medio de diferentes técnicas. Primero se determinó el porcentaje de pérdida por ignición siguiendo la norma NTC 184, posteriormente, se determinó el tamaño y distribución de las partículas por medio de granulometría laser. Además, se utilizó un microscopio electrónico de barrido para observar la morfología de las partículas del material volcánico y por medio de EDS se determinó la composición química en un área puntual de algunas de las partículas. La composición química y mineralógica se determinó por medio de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y petrografía de secciones delgadas. Por último se realizaron análisis termo-gravimétrico (ATG), derivada termo-gravimétrica (DTG) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) de los dos materiales por medio de los cuales se determinó la temperatura umbral de descomposición de sus diferentes constituyentes.

2.3. Métodos de evaluación de la actividad puzolánica del material volcánico del Puracé

La actividad puzolánica del material volcánico del Puracé (MVP) fue determinada por medio de los siguientes métodos:

Método Mecánico: Para determinar el índice de actividad puzolánica (IAP) del material volcánico del Puracé se siguió la norma ASTM C311. Se fabricaron

morteros de cemento Portland tipo III adicionados con 20 % de MVP (en remplazo del cemento), se utilizó arena de Ottawa estandarizada, y una relación agua/cementante de 0,55.

Método químico: El método químico utilizado para determinar la actividad puzolánica del MVP fue el ensayo de Frattini a 7 y 28 días de curado, que corresponde al descrito en la Norma colombiana NTC 1512.

2.4. Efecto de la incorporación del material volcánico del Puracé en las propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland

Se determinó el efecto de la incorporación de diferentes porcentajes del MVP (0 % a 40 %) en remplazo del cemento Portland tipo III en la resistencia mecánica de morteros (moldeados en probetas cilíndricas con dimensiones 30 mm de diámetro y 60 mm de altura). Para esto se utilizó una relación agua/cementante de 0,55, y arena de Ottawa estandarizada en una proporción de 2,75 partes de arena por 1 parte de cementante (cemento + MVP). Esta evaluación se realizó a 7, 28 y 60 días de curado, con el fin de hacer un seguimiento a las reacciones puzolánicas a través del tiempo. Este estudio también permitió conocer el rango de incorporación óptimo a los 28 días de curado, por medio de un diseño de experimentos completamente al azar de efectos fijos balanceado. Las condiciones del diseño se presentan en la **Tabla 1**. Los tratamientos fueron corridos y aleatorizados mediante el programa MINITAB 16 y son mostrados en la **Tabla 2**.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del material volcánico del Puracé

En la **Tabla 3** se presentan los valores de distribución granulométrica del MVP, en esta se puede observar que el 50 % de las partículas de este material se encuentran por debajo de 10 μm, presentando una mayor proporción de partículas finas que el cemento Portland, el cual tiene el 50 % de partículas por debajo de 17 μm. No obstante, el MVP presenta un tamaño de partícula promedio D[4,3] muy similar al cemento Portland, siendo 20,98 μm para el MVP y de 21,08 μm para el cemento Portland.

Estos resultados también pueden ser observados en la **Figura 1** donde se muestran las curvas granulométricas tanto del MVP como del

Tabla 1. Condiciones de diseño experimental para la selección de la proporción óptima del material volcánico del Puracé

Factores	Niveles	Tratamientos	Unidad experimental	Variable de respuesta
Tipo de Mezcla	M1	5	Especímenes de morteros	Resistencia a la compresión
	M2			
	M3			
	M4			
	M5			

Tabla 2. Tratamientos propuestos por el diseño experimental para la selección de la proporción óptima del material volcánico del Puracé

OrdenEst	Corrida	PtType	Bloques	Proporción de cemento	Proporción de MVP
M1	M1	1	1	1	0
M5	M2	0	1	0,9	0,1
M3	M3	-1	1	0,8	0,2
M2	M4	0	1	0,7	0,3
M4	M5	0	1	0,6	0,4

Tabla 3. Valores de distribución granulométrica del material volcánico de Puracé y del cemento Portland tipo III

Distribución	MVP	Cemento Portland III
$d(0,1) (\mu m)$	2,198	2,822
$d(0,5) (\mu m)$	9,985	16,903
$d(0,9) (\mu m)$	56,960	45,459
$D(4,3) (\mu m)$	20,980	21,082

cemento Portland. En esta figura se puede observar que el MVP presenta un comportamiento bimodal en su distribución de tamaños de partícula, ocurriendo un primer máximo alrededor de $50 \mu m$ y el segundo máximo alrededor de $7 \mu m$, presentando una mayor proporción de partículas en este último.

La caracterización morfológica del MVP se realizó por medio de la técnica de MEB (**Figura 2**). Las microfotografías (a, b y c) fueron tomadas a 500X, 1000X y 6000X, respectivamente. En a y b se observa que el MVP se encuentra compuesto predominantemente de pequeñas partículas inferiores a $10 \mu m$ y por partículas

de mayor tamaño que presentan morfología irregular, que pueden ser observadas con mayor definición en la microfotografía (c), donde se evidencia que las partículas del MVP presentan una superficie esponjosa constituida principalmente por sílice y oxígeno; y en menor proporción por azufre, hierro y titanio, según lo obtenido por el análisis puntual de EDS.

En la **Tabla 4** se presentan las composiciones químicas del MVP y del cemento Portland tipo III. En estas se puede observar que la suma de los compuestos de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 para el MVP supera el 70 % que establece la norma ASTM C618 para puzolanas naturales; cabe mencionar que la norma ASTM no especifica la estructura, ni la morfología que deben tener estos compuestos (Çavdar, Yetgin, 2007). El MVP presenta un carácter ácido ya que su contenido de SiO_2 es superior al 65 % y de acuerdo a esto, el MVP puede llegar a tener gran afinidad por la cal en presencia de agua a temperatura ambiente (Valdez, Das y Rivera, 2004), pero se deben tener en cuenta otros factores para garantizar su reactividad, tales como la granulometría y grado de cristalinidad de los materiales, entre otros.

Por otra parte, la pérdida por ignición del MVP (8,35 %) se encuentra dentro del límite establecido en la norma ASTM C 618 para puzolanas naturales ($\approx 10 \%$). Esta

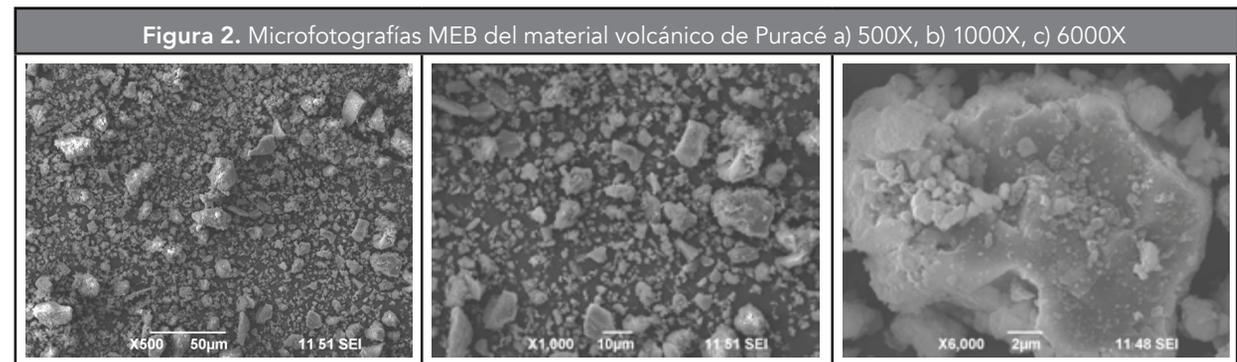
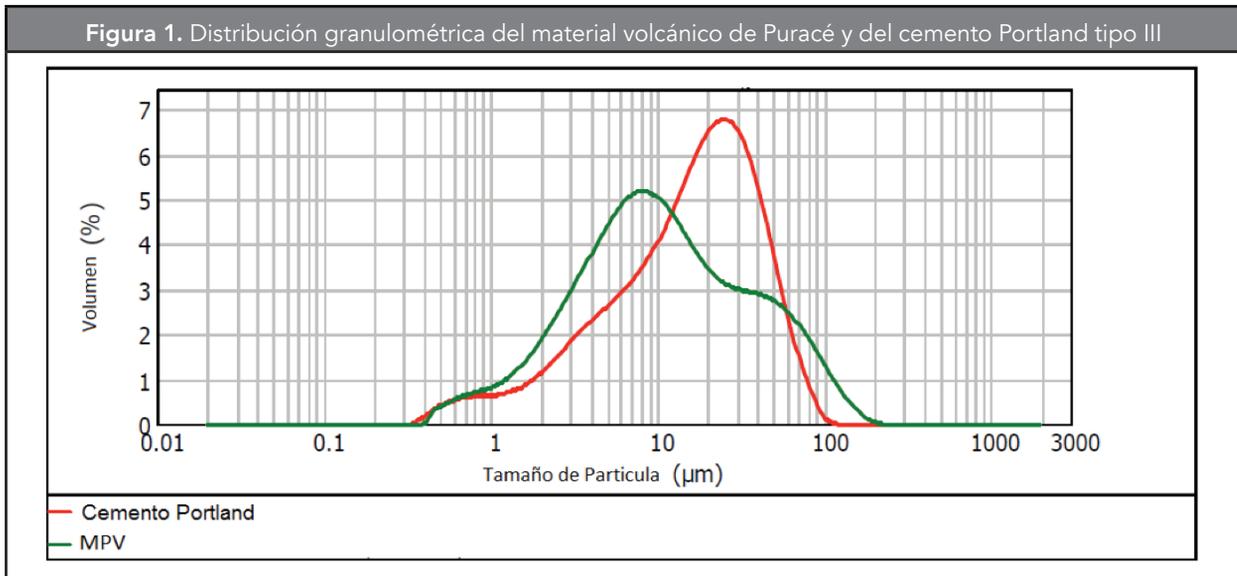


Tabla 4. Composición química del material volcánico de Puracé y del cemento Portland tipo III

Elementos %	SiO ₂	S	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Ba	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Zr	Cr	Cu	Sr	%Pérdida por ignición
MVP	87,45	0,04	1,89	1,16	0,23	0,13	0,07	0,05	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	8,35
Cemento Portland	21,70	1,02	4,39	0,31	5,44	0,00	63,99	0,31	1,52	0,18	0,30	0,14	0,00	0,00	0,14	0,60

pérdida por ignición incluye el azufre elemental y otros elementos volátiles que presenta el MVP en su composición, los cuales fueron detectados por medio del análisis térmico diferencial. En cuanto al cemento Portland tipo III utilizado en esta investigación se puede observar que se encuentra principalmente compuesto por óxido de calcio (CaO) y sílice (SiO₂) y presenta una pérdida por ignición de 0,6 %, esto indica que el cemento no presenta adición, por lo que la reacción de captación de cal correspondería únicamente a la de la reacción puzolánica del MVP.

En la **Figura 3** se presenta el patrón de difracción del MVP obtenido del ensayo cualitativo de DRX. En este patrón de difracción se observa un pico de mayor intensidad correspondiente a la cristobalita alfa con un ángulo de difracción 21,9361° y otros picos de menor intensidad correspondientes al azufre S8, cuarzo, albita y zeolita.

El pico de mayor intensidad indica que la muestra tiene una gran cantidad de cristobalita alfa (SiO₂), la cual cristaliza a altas temperaturas y mas rápido que el cuarzo (Prado, *et al.*, 2007).

El patrón de difracción indica que este material se encuentra compuesto en mayor proporción por fases cristalinas. Sin embargo, las microfotografías de las secciones delgadas del MVP obtenidas del ensayo petrográfico (**Figura 4**), evidencian que este material presenta una fase de vidrio volcánico amorfo y ocasionales cristales opacos dispersos en dicha matriz. Estos resultados demuestran que el MVP presenta un cierto grado de amorficidad y algunos minerales cristalinos como la cristobalita, según la literatura esto indica que el MVP es producto de erupciones volcánicas explosivas, que no tienen el tiempo necesario para cristalizar totalmente, formando un material semicristalino (Siddique, 2008). El grado de cristalinidad del material puede llegar a afectar su reactividad, no obstante, algunos autores como Çavdar y Yetgin (2007) exponen que los minerales cristalinos y los semicristalinos como el cuarzo y la cristobalita también pueden llegar a contribuir en la actividad puzolánica. Esto es corroborado por Valdez, *et al.* (2004) quienes afirmaron que las fases cristalinas, que se encuentran parcialmente desordenadas o se encuentran en un estado metaestable, presentan algo de actividad puzolánica, como es el caso de la cristobalita, sin embargo, su reactividad depende adicionalmente de la cantidad de iones en disolución que se encuentran en su red atómica, ya que estos iones generan una estabilidad estructural del material.

En la **Figura 5**, se presentan los resultados del análisis térmico (TGA y DSC) realizado al MVP en presencia de una atmósfera de oxígeno. La curva TGA (línea siempre decreciente) evidencia una gran pérdida de peso (8,89 % w/w) en un rango de temperatura de 25 a 1000 °C, en este rango ocurren dos cambios de pendiente. En la primera pendiente que muestra la curva (entre 25-150 °C con pérdida de peso de 0,84 % w/w) ocurren dos procesos que pueden ser observados con mas claridad en la curva DSC (línea con picos), esta muestra que entre 70 y 112 °C se presentan picos de índole endotérmica, los cuales pertenecen a la reacción de deshidratación del material y a la transformación de fase del azufre presente en el MVP pasando de rómbico a monoclinico ($\alpha S_8 - \beta S_8$). Según la literatura el azufre rómbico es la forma más estable a baja temperatura y se transforma en azufre monoclinico a una temperatura cercana a los 95,5 °C. La transformación rómbico \leftrightarrow monoclinico consiste, en un cambio de estructura

Figura 3. Patrón de difracción de rayos X del material volcánico de Puracé

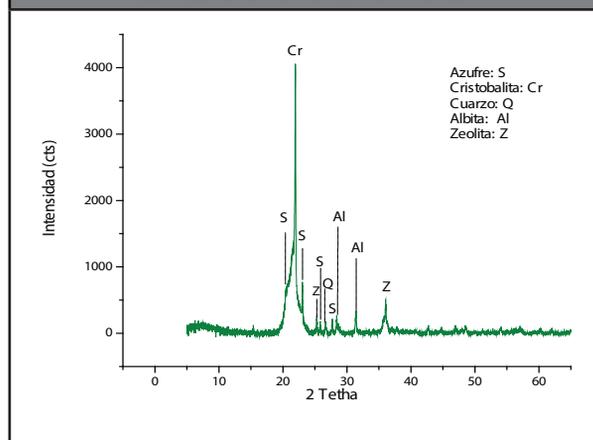
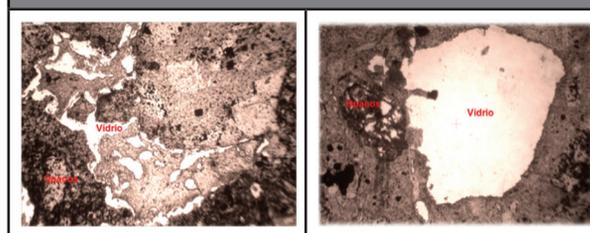


Figura 4. Secciones delgadas del material volcánico de Puracé



cristalina sin modificación en la constitución molecular (Ríos, 1984). En el segundo cambio de pendiente que muestra la curva TGA entre 150 y 420 °C ocurre la mayor pérdida de peso (7,12 % w/w) y corresponde según la curva DSC a una reacción exotérmica con un máximo de temperatura de 242,6 °C, debido a un proceso de combustión (por estar en una atmosfera oxidante), que oxida el azufre produciendo dióxido de azufre (SO_2) y también se puede producir una pequeña cantidad de trióxido de azufre (SO_3).

3.2. Valoración de la actividad puzolánica

3.2.1 Método mecánico-IAP

El Índice de actividad puzolánica (IAP) se expresa como la relación entre la resistencia de un mortero adicionado y la de un mortero sin adición, siendo el porcentaje de incorporación de la adición utilizada de 20 % respecto al peso del cemento según lo descrito en la norma ASTM C311. Los valores de resistencia mecánica e Índices de actividad puzolánica obtenidos para edades de 7 y 28

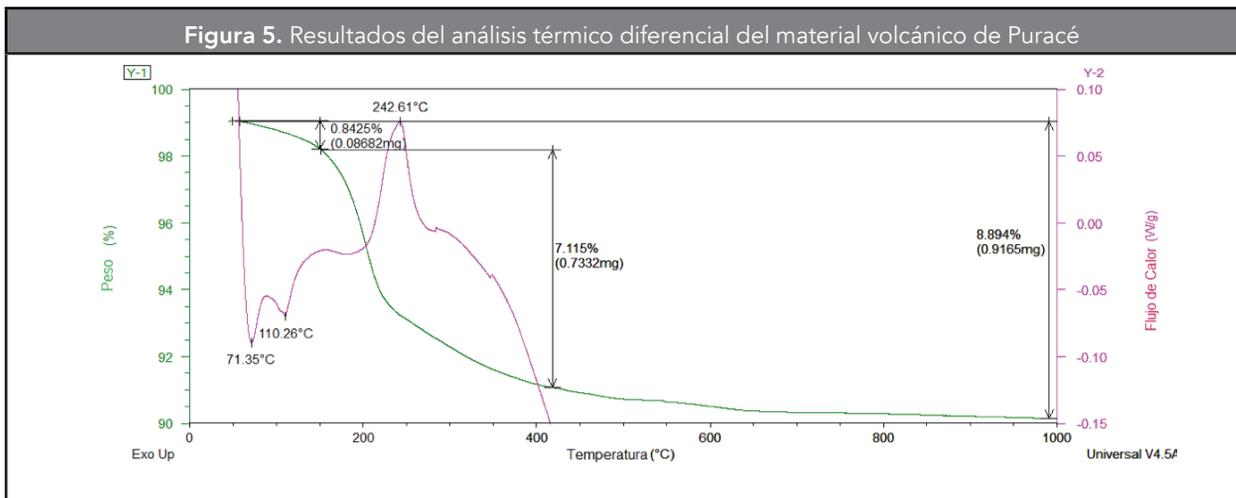


Tabla 5. Valores de resistencia mecánica e índice de actividad puzolánica de morteros de cemento portland adicionados con 20 % de material volcánico de Puracé

Mortero	Resistencia 7 días (MPa)	Resistencia 28 días (MPa)	%IAP _{7 días}	%IAP _{28 días}
Patrón	22,56	26,04	-	-
Adicionado con MVP	18,03	19,91	79,92	76,48

días se presentan en la **Tabla 5**. Estos valores indican de manera general que los morteros adicionados con el MVP superan el valor límite establecido en la norma ASTM C618, 75 % para puzolanas naturales tanto a los 7 como a los 28 días de curado, por lo que se puede afirmar desde el punto de vista mecánico que el MVP tiene aptitud para ser utilizado como una adición Puzolánica natural. No obstante, esta afirmación debe ser corroborada por medio de otros ensayos que permitan complementar el análisis de la reactividad del MVP y una mejor interpretación de los resultados.

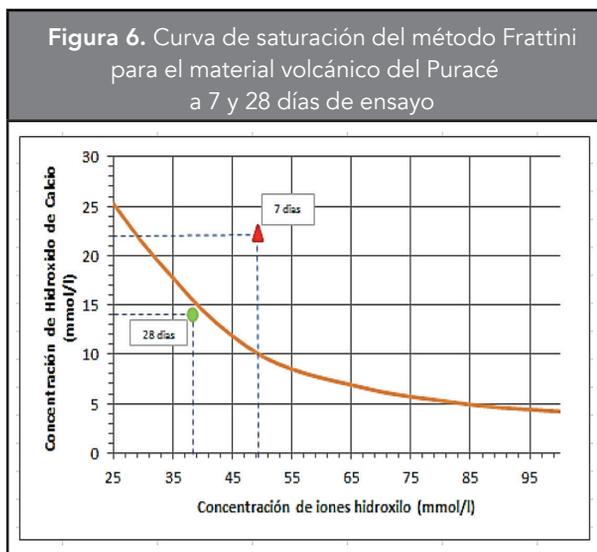
3.2.2. Método químico-Frattini

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos por el método mecánico (IAP) se decidió utilizar el método químico de Frattini. Este método evalúa la actividad puzolánica con base en la concentración de iones de calcio Ca^{2+} (expresado como óxido de calcio, CaO), presente en la solución acuosa en contacto con el cementante (80 % cemento + 20 % puzolana), de acuerdo a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que una puzolana se puede combinar y a la velocidad a la cual ocurra esta reacción, el material de estudio se ubicará en la zona puzolánica o no puzolánica de la curva de saturación de Frattini. Los resultados

obtenidos por este método (**Figura 6**) indican que pasados 7 días de contacto entre los materiales, el consumo de los iones de calcio y la alcalinidad total no fueron suficientes por lo que el MVP se ubicó en la zona no puzolánica de la curva de saturación (sobre la curva). Sin embargo, al aumentar el tiempo de reacción a 28 días, la alcalinidad y la concentración de CaO en la solución disminuyeron, por lo que el MVP logró ubicarse en la región puzolánica de la curva de saturación (debajo de la curva), corroborando los resultados obtenidos por el método mecánico.

3.3. Efecto de la incorporación del material volcánico del Puracé en diferentes proporciones en las propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland

Una vez comprobado que el MVP presentó características físicas y químicas para ser considerado como una puzolana natural, se decidió observar el efecto de la incorporación de diferentes proporciones del MVP en la resistencia a la compresión de morteros de cemento Portland.

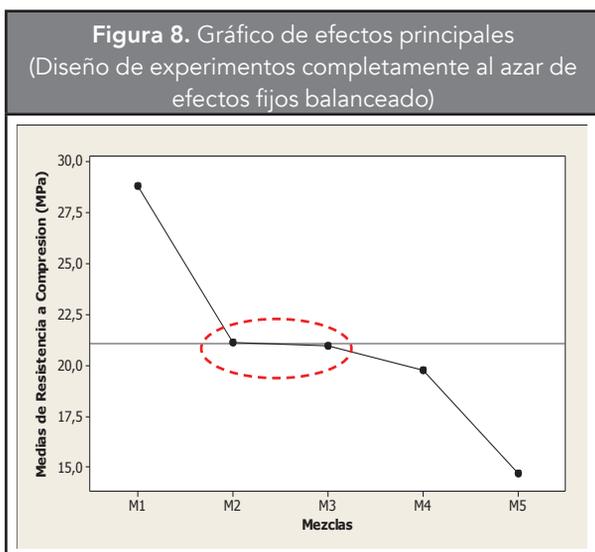
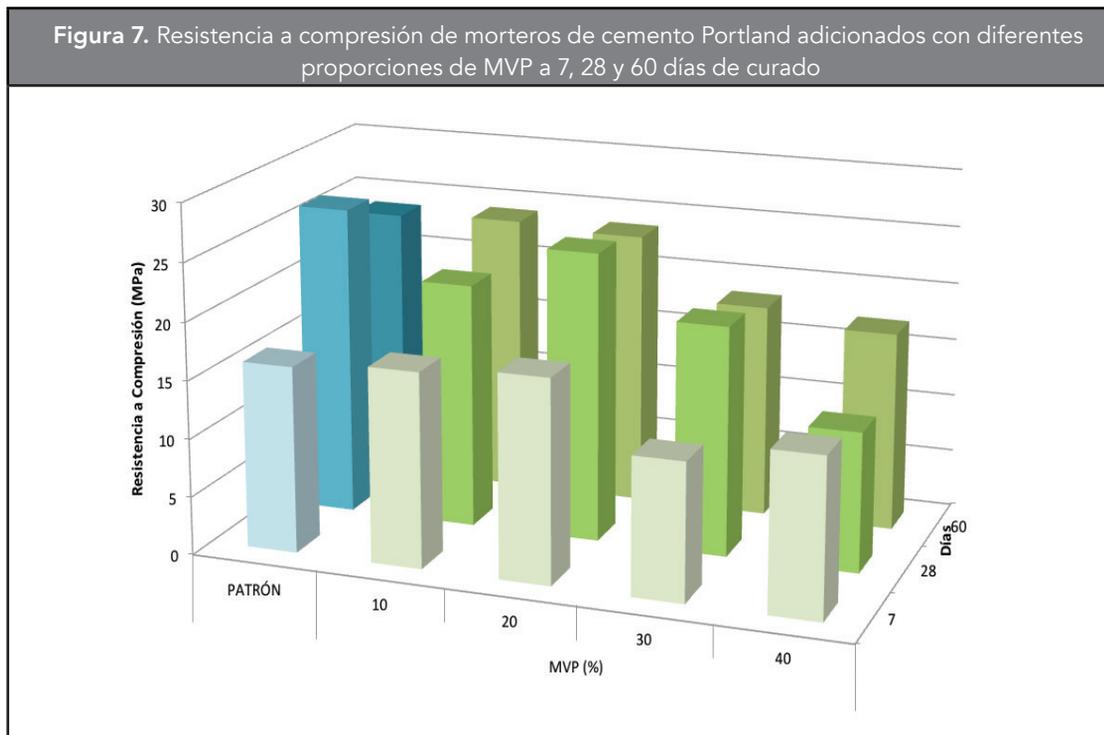


En la **Figura 7** se presentan las resistencias a la compresión de morteros adicionados con MVP desde 10 % hasta 40 % en remplazo del cemento Portland, los cuales fueron comparados con morteros sin adición (Patrón) a diferentes días de curado (7, 28 y 60). Se puede observar que a 7 días de curado los morteros adicionados con 10 % y 20 % de MVP lograron resistencias muy similares al mortero patrón, no obstante los morteros adicionados con 30 % y 40 % de MVP presentaron una disminución en la resistencia de aproximadamente 15 %. Por otra parte, a 28 días de curado las diferencias en las resistencias aumentaron considerablemente para los morteros de 10 %, 30 % y 40 % de MVP en comparación con los morteros patrón. No obstante, los morteros adicionados con 20 % de MVP presentaron el mejor desempeño resistente de los morteros adicionados a esta edad (28 días) en relación al mortero patrón. Pasados 60 días de curado se observa que el mortero patrón no presentó cambios significativos en su resistencia, debido a que ya alcanzó su máxima resistencia, mientras que los morteros adicionados con el MVP continúan aumentando su resistencia y en especial los morteros adicionados con 10 % y 20 % de MVP que lograron alcanzar la resistencia del mortero patrón. Estos resultados permiten evidenciar el efecto puzolanico del MVP a través del tiempo, logrando obtener resistencias muy similares a la del mortero de referencia con un menor consumo de cemento. Por otra parte, el análisis del diseño de experimentos arrojó un coeficiente de determinación (R^2) de 68,35 %, lo cual indica que los datos utilizados

se ajustan al modelo lineal general. Además, a un nivel de significancia de 0,002 se evidencia que existen diferencias entre las medias de resistencia a compresión de cada mezcla (M1, M2, M3, M4 Y M5), es decir que cada una de ellas ejerce un efecto distinto sobre las resistencias a la compresión. Por esta razón se decidió realizar una prueba post-Anova utilizando el método de Tukey a un nivel de significancia de 3 % con el fin de encontrar el rango de incorporación óptimo del MVP en los morteros a 28 días de curado encontrando que las mezclas M1 y M2 se encuentran ubicados en el mismo grupo de medias (**Tabla 6**), es decir que presentan medias similares. Según esto, la mezcla M1 representa el rango de incorporación óptimo del MVP, 10 % como remplazo del cemento Portland tipo III, con el cual se obtienen propiedades mecánicas similares al mortero patrón. No obstante, como se puede observar en el gráfico de efectos principales (**Figura 8**) se podría lograr incorporar hasta un 20 % del MVP con una pequeña desviación de la resistencia media reportada por el diseño de experimentos. Estos resultados representan numerosas ventajas desde el punto de vista económico, tecnológico y ecológico, ya que a nivel operativo el uso de adiciones puzolánicas permite reducir costos relacionados con el consumo de cemento que se puede ver reflejado en el costo total de la obra. Al mismo tiempo se pueden observar ventajas desde el punto de vista ambiental ya que al disminuir el consumo de cemento también se reducen las grandes emisiones a la atmósfera de CO_2 que se generan en la producción de cemento Portland (Ozgunler, 2011).

Tabla 6. Prueba Post-Anova utilizando método Tukey (Diseño de experimentos completamente al azar de efectos fijos balanceado)

Mezclas	N	Medias de Resistencia a la compresión	Grupo	
			A	B
M1	3	28,8	A	
M2	3	21,1	A	B
M3	7	20,9		B
M4	3	19,8		B
M5	3	14,7		B



4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, se encontró que el material volcánico del Puracé, se encuentra principalmente compuesto por sílice (87,45 %) y materiales volátiles como el azufre, los cuales se ven reflejados en el ensayo de pérdida por ignición y el análisis termogravimétrico. Tanto la

sílice y el azufre según el análisis de DRX se encuentran en la fase cristobalita α y azufre S_8 . Por otra parte, la petrografía demostró que el MVP presenta una fase de vidrio volcánico y ocasionales cristales opacos dispersos en dicha matriz vítrea, por lo que se pudo deducir que este material es producto de erupciones volcánicas explosivas con rápido enfriamiento que no permitió que el proceso de cristalización se completara.

La valoración puzolánica de este material demostró que el MVP presenta características físicas y químicas apropiadas para ser considerado como una puzolana natural presentando índices de actividad puzolánica superiores al 75 %, especificado en la norma ASTM C618 y ubicándose por debajo de la curva de saturación de Frattini. Además, se encontró por medio del diseño de experimentos que el porcentaje de incorporación óptimo del MVP es el 10 %, porcentaje con el cual se obtuvo un desempeño resistente muy similar al del mortero patrón. No obstante, el diseño de experimentos demostró que puede ser incorporado hasta un 20 % de MVP con una pequeña desviación de la resistencia media arrojada por el diseño.

FINANCIAMIENTO

Se reconoce el apoyo recibido por medio de beca doctorados nacionales Colciencias 2010 Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación; del Grupo de Investigación de Materiales Compuestos, el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) y la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

REFERENCIAS

- Alp, I.; Deveci, H.; Sungun, Y.; Yilmaz, A.; Kesimal, A.; Yilmaz, E. (2009). Pozzolanic Characteristics of a Natural Raw Material for Use in Blended Cements. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 33(B4), pp. 291–300.
- American Society for Testing and Materials (2012). ASTM C618/C618-12a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2013). ASTM C311/C311M-13 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Çavdar, A.; Yetgin, Ş. (2007). Availability of Tuffs from Northeast of Turkey as Natural Pozzolan on Cement, some Chemical and Mechanical Relationships. *Construction and Building Materials*, 21(12), pp. 2066–2071.
- Costafreda, J.; Calvo, B. (2009). Valoración de la calidad de algunos áridos a partir de la interpretación de sus propiedades puzolánicas. *Los áridos: una materia prima estratégica*, 1, pp. 135–138.
- Costafreda, J. L.; Calvo, B.; Parra, J. L. (2011). Criterios para el aprovechamiento de tobas dáciticas en la sustitución de cemento pórtland en morteros y hormigones. *Interempresas - Obras Públicas* [En línea] Disponible en: <http://www.interempresas.net>. [Consultado 3 de enero 2012].
- Hossain, K. (2003). Blended cement using volcanic ash and pumice. *Cement and Concrete Research*, 33(10), pp. 1601–1605.
- Hossain, K. (2005). Volcanic Ash and Pumice as Cement Additives: Pozzolanic, Alkali-Silica Reaction and AutoClave Expansion Characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1141–1144.
- Hossain, K. (2006). High Strength Blended Cement Concrete Incorporating Volcanic Ash: Performance at High Temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), pp. 535–545.
- Hossain, K.; Lachemi, M. (2004). Corrosion Resistance and Chloride Diffusivity of Volcanic ash Blended Cement Mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(4), pp. 695–702.
- Hossain, K.; Lachemi, M. (2006a). Performance of Volcanic Ash and Pumice Based Blended Cement Concrete in Mixed Sulfate Environment. *Cement and Concrete Research*, 36(6), pp. 1123–1133.
- Hossain, K.; Lachemi, M. (2006b). Development of Volcanic Ash Concrete: Strength, Durability, and Microstructural Investigations. *ACI materials journal*, 103(1), pp. 11-17
- Hossain, K.; Lachemi, M. (2007). Strength, Durability and Micro-Structural Aspects of High Performance Volcanic Ash Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 759–766.
- Hossain, K.; Lachemi, M. (2010). Fresh, Mechanical, and Durability Characteristics of Self-Consolidating Concrete Incorporating Volcanic Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), pp. 651–657.
- Jamshidi, M.; Najimi, M.; Pourkhorshidi, A. R. (2009). Investigation on Expansion of Mortars Containing Tuff Natural Pozzolan Due to Sulfate Attack. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 10(6), pp. 667–679.
- Kaid, N.; Cyr, M.; Julien, S.; Khelafi, H. (2009). Durability of Concrete Containing a Natural Pozzolan as Defined by a Performance-Based Approach. *Construction and Building Materials*, 23(12), pp. 3457–3467.
- Kirk, S.; Zuleta, R. (2000). *A Study of the Volcanic Ash Originating from Mount Pinatubo, Philippines: Philippines, Public Works*, 2000, 44p.
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic Cements. *Cement and Concrete Composites*, 15(4), 185–214.
- Morandi, J.; Uliarte, R.; Oliva, C. (2000). High Performance Concrete in Areas Seismically Active of the Argentinean Republic. *WCEE*, pp. 1–7.
- Norma Técnica Colombiana (2001). NTC 184 Cementos. Métodos de análisis químico de los cementos hidráulicos.
- Norma Técnica Colombiana (2009). NTC 1512 Cementos. Ensayo químico para determinar la actividad puzolánica.

- Ozgunler, M.; Ozgunler, S. (2011). A Research on Karamursel Region Volcanic Tuff as a Pozzolanic Additive in Repair Mortars Used for Historical Buildings. *Scientific Research and Essays*, 6(3), pp. 641–647.
- Prado, B.; Duwig, C.; Hidalgo, C.; Gómez, D.; Yee, H.; Prat, C.; Esteves, M., et al. (2007). Characterization, Functioning and Classification of Two Volcanic Soil Profiles under Different Land Uses in Central Mexico. *Geoderma*, 139(3-4), pp. 300–313.
- Ramezaniyanpour, A.; Samadian, M.; Mahdikhani, M. (2012). Engineering Properties and Durability of Self-Consolidating Concretes (sc) Containing Volcanic Pumice Ash. *Civil Engineering*, 13(4), pp. 521–530.
- Ríos, E. (1985). *Química*: Barcelona, Reverté, 500 p.
- Rodríguez, R.; Uribe, R. (2002). Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability. *Cement and Concrete Research*, 32(12), pp. 1851–1858.
- Rosell-Lam, M.; Villar-Cociña, E.; Frías, M. (2011). Study on the Pozzolanic Properties of a Natural Cuban Zeolitic Rock by Conductometric Method: Kinetic Parameters. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 644–650.
- Siad, H.; Mesbah, H. A.; Kamali, B.; Khelafi, H.; Moulli, M. (2010). Influence of Natural Pozzolan on the Behavior of Self-Compacting Concrete under Sulphuric and Hydrochloric Acid Attacks, Comparative Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1B), pp. 184.
- Siddique, R. (2008) *Waste Materials and By-Products in Concrete*: Berlin, Springer-Verlag, 413 p.
- Türkmenoğlu, A.; Tankut, A. (2002). Use of Tuffs from Central Turkey as Admixture in Pozzolanic Cements: Assessment of their Petrographical Properties. *Cement and Concrete Research*, 32(4), pp. 629–637.
- Uzal, B.; Turanlı, L. (2003). Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1777–1781.
- Valdez, P.; Das, T.; Rivera, R. (2004). Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. *Ciencia UANL*, 7(2), 190-195.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Burgos-Galindo, D.M.; Cardona, L.M., Gordillo-Suárez, M.; Delvasto-Arjona, S. (2015). Valoración Y Efectos Puzolánicos del Material Volcánico del Puracé. *Revista EIA*, 12(23) enero- junio, pp. 83-93. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.23.83-93>.