

Análisis de las características mineralógicas y petrográficas de piedra “cantera” de Oaxaca, México, y su relación con sus propiedades de resistencia y durabilidad

Analysis of the Mineralogical and Petrographic Characteristics of Stone Quarry “Cantera” from Oaxaca, Mexico, and Its Relation with Its Resistance and Durability Properties

Heidy Gómez Barranco
Universidad Autónoma Benito Juárez
de Oaxaca (UABJO)
arq.heidy.gb@gmail.com

Elia Mercedes Alonso Guzmán
Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo (UMSNH)
eliamercedesalonso@gmail.com

Herwing Zeth López Calvo
Universidad Autónoma Benito Juárez
de Oaxaca (UABJO)
herwingzeth@gmail.com

Perla María Arellano Sosa
Instituto Politécnico Nacional
asperla_5@hotmail.com

DOSSIER

Resumen

En el presente artículo se describen los resultados de un proyecto de investigación realizado para caracterizar las propiedades fisicoquímicas de cinco tipos de roca volcánica (riodacita), comúnmente conocida como “cantera” y utilizada tradicionalmente en la construcción y restauración de edificios históricos en la ciudad de Oaxaca, México. En el programa experimental fueron analizadas cinco tipos de piedra para conocer sus características mineralógicas y petrográficas mediante fluorescencia de rayos X y análisis petrográfico. De la misma manera, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, densidad y absorción. Finalmente, los resultados obtenidos en el programa experimental fueron analizados y correlacionados con las propiedades de resistencia y durabilidad de los cinco tipos de piedra evaluados.

Palabras clave: caracterización fisicoquímica, rocas volcánicas, petrografía, mineralogía

Abstract

This article details the results of a research project carried out to characterize the physicochemical properties of five types of volcanic stone (riodacite), commonly known as “cantera” and traditionally used for construction and restoration of historic buildings in the city of Oaxaca Mexico. In the experimental program, five stone samples were analyzed in order to know their petrographic and mineralogical characteristics by X-ray fluorescence and petrographic analysis. In the same manner, testing for compressive strength, density and absorption was carried out. Finally, the results in the

Fecha de recepción: 26 de julio de 2019
Fecha de aceptación: 25 de agosto de 2019

DOI: 10.22201/fa.2007252Xp.2019.20.72313

experimental program were analyzed and correlated with the strength and durability properties of the five types of stone.

Keywords: *physicochemical characterization, volcanic stones, petrography, mineralogy*

Introducción

Durante la época previa a la aparición del concreto y el acero, en casi todas las ciudades del mundo la piedra fue el principal material para la edificación de obras civiles, tales como templos, catedrales, edificios públicos y palacios. Esto se debió principalmente a la asequibilidad de grandes bancos de piedra en el entorno inmediato a donde fueron erigidas las grandes ciudades, por lo que es común que los inmuebles considerados históricos estén contruidos con el mismo tipo de roca procedente de sitios cercanos, cuyas características fisicoquímicas dependen principalmente de las características geológicas del entorno. Un ejemplo claro de lo anterior lo podemos encontrar en el centro histórico de la ciudad de Oaxaca de Juárez, inscrito en la Lista de Patrimonio Mundial de la Unesco en 1987,¹ donde gran número de edificaciones catalogadas como históricas fueron contruidas con piedra "cantera" proveniente de diversos bancos cercanos de la región.²

A pesar de la importancia que supone el contar con el reconocimiento como Patrimonio Mundial, se ha llevado a cabo poco o nulo trabajo de investigación sobre la caracterización y análisis de las propiedades fisicoquímicas de los diversos tipos de piedra utilizados en la construcción y restauración de los inmuebles localizados en el centro histórico de la ciudad de Oaxaca. Dentro de las escasas investigaciones existentes en la literatura, se encuentra una realizada en el año 1991 por Reséndiz y Aquino,³ quienes elaboraron un estudio sobre las características mineralógicas de cuatro tipos de cantera provenientes de bancos cercanos a esta ciudad. El análisis de caracterización mineralógica se realizó por medio de fluorescencia de rayos X. Los resultados obtenidos permitieron concluir que las canteras localizadas en los bancos cercanos a la ciudad de Oaxaca fueran identificadas como zeolitas minerales vulcanosedimentarias, denominadas de acuerdo con su origen como: zeolitas de origen hidrotermal y zeolitas de sistemas hidrológicos abiertos.

Es importante mencionar que dicho estudio fue desarrollado hace aproximadamente tres décadas, por lo que se vuelve imprescindible incrementar los esfuerzos de investigación científica encaminados a caracterizar los materiales pétreos utilizados en construcción y restau-

1 Ver: Unesco, "Declaratoria de Patrimonio de la Humanidad 1987", consultado el 25 de junio de 2019, <https://whc.unesco.org/en/list/415>.

2 Ver: Heidi Gómez-Barranco, *Estudio y protección del patrimonio arquitectónico en cantera del centro histórico de la ciudad de Oaxaca de Juárez (México)* (tesis de doctorado en Conservación de Patrimonio Histórico de la Universidad de Jaén, España, 2018), 22-25.

3 Ver: Antonio Aquino y Fernando Reséndiz L., "Canteras oaxaqueñas. ¿Algo más que un material tradicional de construcción?", *Revista Oaxaca. Ciencia y Tecnología* (4-5) (1991): 5-10.

ración de edificios históricos mediante el empleo de técnicas de caracterización actuales, como podrían ser la mineralogía, la petrografía, la cristalografía, la difracción de rayos X (DRX), entre otras. Dichas técnicas han mostrado ser altamente eficaces en el análisis y caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los materiales pétreos utilizados en la construcción.⁴

En este contexto, la presente investigación toma relevancia, ya que tiene como objetivo determinar las características mineralógicas y petrográficas mediante fluorescencia de rayos X y análisis petrográfico de cinco tipos de piedra “cantera” de diferentes bancos ubicados en comunidades cercanas a la ciudad de Oaxaca, México. Los resultados obtenidos fueron correlacionados con sus propiedades de resistencia y durabilidad.

Materiales y métodos

Criterios de selección de los tipos de piedra

Para llevar a cabo el programa experimental, se seleccionaron cinco tipos de piedra cantera tomando como criterios de elección su disponibilidad, su color y su potencial demanda en los procesos de restauración y reconstrucción de edificios históricos en la ciudad de Oaxaca. Se seleccionaron tres bancos de extracción de piedras (cantera): Magdalena Apasco Etlá, Mitla y Suchilquitongo; del primer banco se obtuvieron dos especímenes, cantera verde y cantera amarilla; mientras que del segundo y tercero, dos variedades de cantera rosa. A ello se sumó una quinta muestra de cantera verde proveniente del poblado de Santa María Ixcotel, la cual se obtuvo durante el proceso de restauración de la iglesia de San Agustín, ubicada en el centro histórico de Oaxaca, debido a que las rocas originarias del mencionado banco se agotaron algunos años atrás. En la siguiente tabla se observan las características y nomenclatura utilizadas para identificar los diferentes tipos de piedra evaluados en el trabajo experimental. Asimismo, se indica la procedencia de acuerdo con la ubicación de los bancos de comunidades cercanas a la ciudad de Oaxaca, México.

4 Ver: Liberto de Pablo-Galán, “Geochemical Trends in the Alteration of Miocene Vitric Tuffs to Economic Zeolite Deposits, Oaxaca, México”, *Applied Geochemistry* 1(2) (1986): 273-285; Rosa María Esbert, Modesto Montoto, Jorge Ordaz, “Rocks as Construction Materials: Durability, Deterioration and Conservation”, *Materials of Construction* 74 (1991): 113-27; A. Elena Charola, “Stone deterioration in historic buildings and monuments” (conferencia presentada en *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, ICOMOS en el 2004, vol. 1), 3-14; María Navarrete, Wilfrido Molina, Elia Mercedes, E.M. Alonso-Guzmán, C. Lara-Gómez, J. A. Bedolla-Arroyo, H. Chávez y J. C. Arteaga, “Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura”, *Revista ALCONPAT* 3(2) (2013): 129-139; Myron G. Best, *Igneous and Metamorphic Petrology* (EEUU: Blackwell Publishing, 2003): 16-50; Salvador Domínguez-Bella y Diego Morata-Céspedes, “Aplicación de las técnicas mineralógicas y petrológicas a la arqueometría. Estudio de materiales del Dolmen de Alberite (Villamartín, Cádiz), consultado el 24 de junio de 2019, <https://www.researchgate.net/publication/43600690>.

Características de la piedra "cantera" evaluadas en el programa experimental			
Geometría	Color	Procedencia	Nomenclatura
		Magdalena Apasco Etlá	VMA
		Santa María Ixcotel	CVS
		Mitla	CRM
		Suchilquitongo, Etlá	RSE
		Magdalena Apasco, Etlá	CAM

Análisis mineralógico mediante fluorescencia de rayos X (FRX)

Para realizar las pruebas de fluorescencia de rayos X (FRX) se emplearon dos métodos de medición, consistentes en el denominado Método de fusión MBL/Fluorescencia RX, y el Método de calcinación a 100°C/Gravimetría. Estos métodos fueron utilizados para determinar los elementos/compuestos⁵ que se encontraban en cada una de las piedras canteras, de tal manera que muestran con mayor exactitud el porcentaje de cada elemento. Adicionalmente, se determinó el potencial de hidrógeno (pH) de cada una de las muestras, de acuerdo con la norma ASTM-C4262⁶, mediante un medidor Hi98128 pHep 5pH/ con ensayador de temperatura.

Análisis petrográfico mediante microscopía

La petrografía es un campo de la petrología que se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o láminas delgadas y las clasifica según su textura y composición mineralógica. Este estudio se llevó a cabo en el departamento de mineralogía del Servicio Geológico Mexicano, mediante un microscopio petrográfico de polarización marca Leica, modelo DM4500P.

5 Ver: Jorge Ordaz, "Características físicas y alterabilidad de la piedra de Villamayor (Salamanca)", *Materiales de construcción* 33(190-191): 619-663, consultado el 24 de junio de 2019, <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/973/1030>.

6 Ver: ASTM D4262-05, (Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.

Evaluación de propiedades de resistencia y durabilidad

Para estimar las propiedades de resistencia y durabilidad de cada una de las diferentes variedades de piedra fueron realizadas pruebas de resistencia a la compresión y pruebas de densidad y absorción de agua; estas dos últimas como parámetros de durabilidad. Con este propósito, fueron cortados cinco especímenes (réplicas) por cada tipo de piedra, utilizando una sierra de diamante de 11 pulgadas marca Dewalt. Las probetas fueron ensayadas bajo normativas y equipos estandarizados, de acuerdo con el programa experimental que se presenta en la siguiente tabla.

Programa experimental para determinar las propiedades de resistencia y durabilidad		
Propiedad por evaluar	Características de los especímenes	Método de ensayo y equipo
Resistencia a la compresión	Prismas de 100 mm x 100 mm y 200 mm de altura	Los ensayos se realizaron con una máquina Pilot Compact-Line automatic compression machine, 125'000 lbf (556 kN) cap. Modelo 50 – A12C04, la prueba se efectuó a temperatura ambiente con una velocidad de carga de 0.5 mm/min. de acuerdo con ASTM C170-170M-17.
Densidad	Cubos de 100 mm x 100 mm x 100 mm por lado	ASTM C127-15: Método de prueba estándar para la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos (pp. 76-81). ASTM C170 / C170M-177 West Conshohocken, PA: ASTM International 2009.
Absorción	Prismas de 100 mm x 100 mm y 50 mm de espesor	

Resultados y discusión

Pruebas mineralógicas

Los resultados del análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) se presentan en la tabla siguiente. Como se puede observar, todas las canteras cuentan de manera consistente con los siguientes elementos: alúmina (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de potasio (K_2O), óxido de magnesio (MgO), óxido de sodio (Na_2O), policarbonato (PXC), óxido de silicio (SiO_2), óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de manganeso (MnO) y óxido de titanio (TiO_2). Los resultados obtenidos también revelaron que la mayoría de las piedras “canteras” analizadas, excepto la cantera de Suchilquitongo CRS, se pueden clasificar como dacitas, “rocas ácidas”, de acuerdo con la clasificación propuesta en el diagrama Total Álcali Sílice, comúnmente conocido como TAS8. Los resultados de dicha clasificación se esquematizan en la siguiente imagen. En este

7 Ver: ASTM C170/C170M-17, *Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.

8 Ver: Roger Walter Lemaitre, *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* (Cambridge, Nueva York: Cambridge University Press, 2002).

esquema se muestran los tipos de rocas y sus nombres propuestos, de acuerdo con el tipo y cantidad de minerales que contienen. En concordancia con la clasificación propuesta en el diagrama TAS, se puede indicar que los cinco tipos de piedra cantera analizadas cuentan con elementos de riolita, dacita o andesita, en cuanto al porcentaje de la cantidad de sílice que contienen (%wt).

Características mineralógicas de los cinco tipos de piedra												
Métodos usados =>	27	27	27	27	27	27	14	27	27	27	27	
Límites de detección	0.09	0.01	0.02	0.09	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.003	0.07	
Elemento/Compuesto	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	PXC	SiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	
Unidades	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	pH
Nomenclatura												
CAM	12.33	1.38	0.56	6.32	0.18	<0.03	9.85	69.38	<0.02	0.02	0.13	9.00
CRM	15.99	2.95	2.31	3.14	0.4	2.59	2.14	69.58	0.03	0.01	0.39	9.79
RSE	12.73	1.07	1.95	5.13	0.26	1.72	5.48	70.78	<0.02	0.03	0.14	9.19
VMA	11.85	1.91	1.56	5.41	0.5	<0.03	9.05	69.59	<0.02	0.01	0.14	9.16
CVS	12.08	2.38	1.28	3.23	0.17	1.73	10.08	68.69	<0.02	0.01	0.15	10.0

Fuente: Elaboración propia

Notas: Método(s) de medición aplicado(s): 27=Fusión MBL/Fluorescencia RX, 14=Calcinación a 100°C/Gravimetría, pH= potencial hidrógeno de acuerdo con la norma ASTM-C4262

De acuerdo con una investigación realizada por Myron (1981), las rocas que contienen de 63 a 70% de sílice pueden ser consideradas como dacitas; si contienen más de 70% se trata de riolitas, y si adicionalmente contienen 66% o más, se pueden clasificar como rocas ácidas.⁹ Además del porcentaje de silicatos en la roca, se debe considerar su alcalinidad en función de su contenido en óxido de sodio (Na₂O) y óxido de potasio (K₂O), elementos representativos del diagrama de sílice vs. álcali total (TAS) que identifica algunas especies de rocas ígneas.¹⁰ La Cantera Rosa de Suchilquitongo Etlá, que contiene una cantidad de sílice mayor, se clasifica en el grupo de riolítica teniendo en cuenta la relación entre el porcentaje en peso de álcali combinado (Na₂O + K₂O) y el contenido de sílice según la clasificación de Total Álcali del TAS; este componente alcalino aparece en las muestras como feldespato de potasio (sanidina, ortoclasa o raramente anortoclasa)

⁹ Myron G. Best, *Igneous and metamorphic petrology* (Nueva York: Freeman, 1981)

¹⁰ Ver: A. Streckeisen, B. Z. "Igneous Rocks: A Classification..."

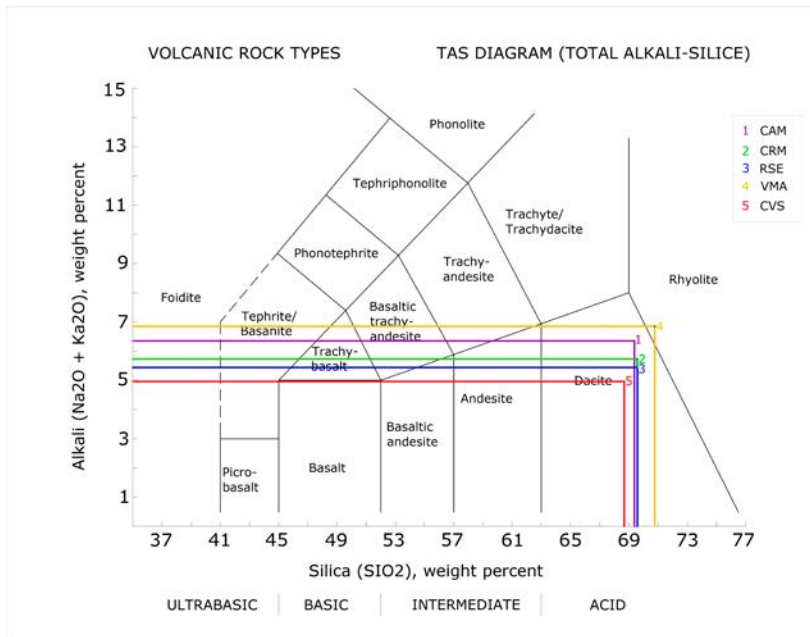


Diagrama TAS en el cual se identifican los cinco tipos de rocas evaluadas. Se puede apreciar que todas son rocas ácidas y que se sitúan muy cerca del límite entre dacita y riolita, especialmente las canteras verdes y las rojas. Fuente: Elaboración propia

Análisis de petrografía

El análisis petrográfico arrojó los siguientes resultados. De acuerdo con su composición mineralógica, la Cantera Verde de San Agustín (CVS) podría clasificarse como una roca del tipo vitrificado riódacítico, la cual contiene una matriz vítrea con textura perlítica formada con cerca de 96% de vidrio y 2% de plagioclasas que se presentan como cristales anhedrales, generalmente fenocristales inmersos dentro de la matriz. Los feldespatos están presentes como pequeños cristales y fenocristales de formas subhedrales y de presencia muy escasa, alrededor de 1%. El análisis de petrografía permitió observar microcristales tabulares de biotita y hornblenda de presencia errática (>1%); por su parte, el cuarzo se presenta en pequeños cristales con bordes angulosos y tiene escasa presencia en la muestra de cantera CVS (<1%).

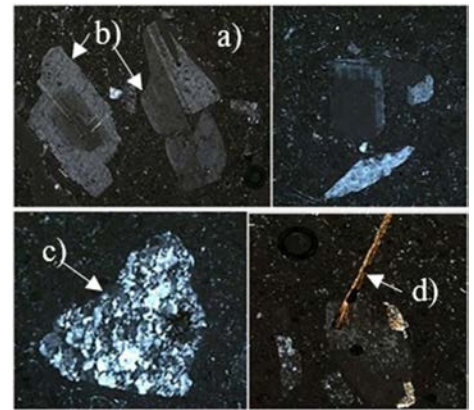
Como se puede observar, la Cantera Verde de Magdalena Apasco Etlá (VMA) presentó una composición mineralógica similar a la observada en la CVS; por ello se podría clasificar como una roca tipo vitrificado riódacítico, con variación en su matriz ligeramente desvitrificada que origina minerales arcillosos, en presencia de un 95% de vidrio. Las plagioclasas se presentan en cerca de 2% como plagioclasas de líneas-maclas y zonadas; tanto los feldespatos como el cuarzo se muestran en 1% como fenocristales y microcristales. En este caso, la biotita aparece de forma errática; es decir, en un porcentaje menor a 1%, de modo que está casi ausente, al igual que roca incrustada de tipo dacítico, que se obtiene por la erosión que arrastra diferentes especies de rocas y minerales.

En cuanto al análisis petrográfico realizado a la Cantera Rosa de Mitla (CRM), los resultados permitieron clasificarla como una roca de tipo riódacítico, con una matriz vítrea que ocupa entre 50 y 55%, con

aspecto pulverulento y textura grande poiquilítica. Las plagioclasas se encuentran presentes en un 20% y son de tipo zonadas en su mayoría, por los cortes o por su crecimiento con diferentes minerales en la misma plagioclasa. Detalles de este análisis aparecen de manera cualitativa en la imagen respectiva. El análisis petrográfico permitió identificar que los feldespatos se encuentran visibles en un aproximado a 10% como 3D y de diversos tamaños, desde cristales grandes y pequeños, hasta fenocristales. El cuarzo está presente en un aproximado de 10%, con colores blancos y negros, provocando el tipo de textura y dureza de esta piedra cantera. Por otro lado, la biotita se encuentra en menor cantidad, con cerca de 5% de aparición, pero se distingue con mucha mayor facilidad que los demás minerales por su apariencia parda y color marrón con forma lineal.

El análisis petrográfico realizado a la Cantera Rosa de Suchilquintongo (RSE) permitió clasificarla como una toba volcánica de composición riolita con una matriz vítrea y textura perlítica, con una matriz vitrificada abundante, de entre 90 a 95%. Todos los minerales que aparecen en RSE se encuentran en forma errática y representan el 5% en su totalidad. De la misma manera, fueron identificados pequeños fenocristales y feldespato en su forma de dos caras, las plagioclasas zonadas y líneas de maclas en pequeños cristales, el cuarzo en su color blanco con bordes y la biotita parda con presencia casi nula.

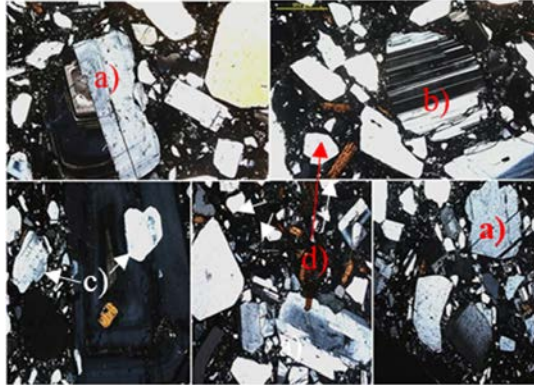
Por su parte, el análisis petrográfico mostrado en la última imagen corresponde a la Cantera Amarilla de Magdalena Apasco Etlá (CAM); permitió identificarla como una roca de composición riolítica con una matriz vítrea y textura perlítica. El vidrio presente se encuentra entre un 90% a 95%, cuya desvitrificación moderada produce minerales arcillosos, por lo que se observan pequeños puntos alrededor de todos los demás minerales presentes. El feldespato se encuentra de forma errática, se ha visto únicamente como pequeños fenocristales muy dispersos en la roca. Asimismo, las plagioclasas, por lo que se observan en su mayoría en microcristales de forma línea de macla. El cuarzo se encuentra en muy pequeñas cantidades y en diminutos tamaños de color blanquecino, así como la biotita parda, que se observó en zona muy alejadas una de otra, formando así 5% restante de la roca.



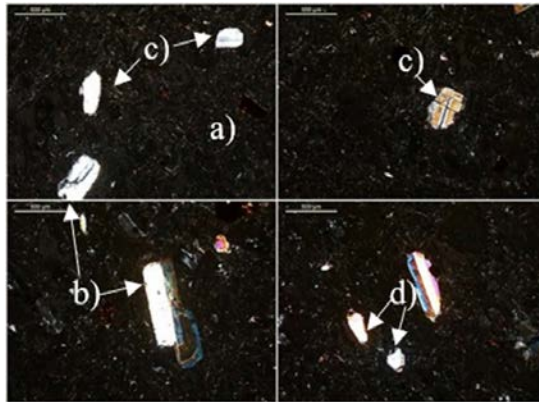
Petrografía de CVS en la cual se observa: a) matriz vítrea de textura perlítica; b) fenocristales de plagioclasa; c) cristales de feldespatos con caras parcialmente formadas; d) escasa presencia de biotita en forma tubular. Fuente: Elaboración propia



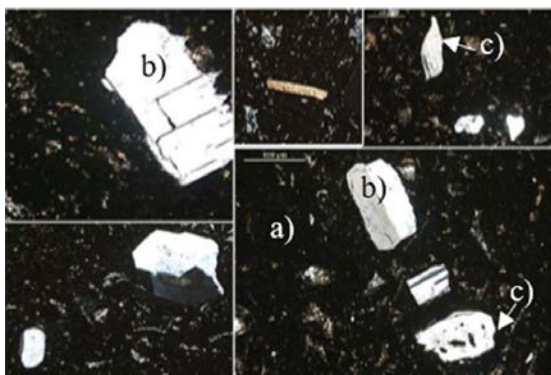
Petrografía de VMA cuya mineralogía es muy similar a la CVS. Las variaciones principales son los tamaños de los cristales: a) se observa la matriz vítrea con algo de arcillas; b) plagioclasa con textura de líneas de macla; c) fenocristales y microcristales de cuarzo y feldespatos, donde la diferencia está en el contenido de silicatos. Fuente: Elaboración propia



Petrografía de CRM, en la cual no se observa la matriz por su bajo contenido en relación con las demás rocas; a) plagioclasas zonadas con otros minerales en el interior; b) feldespato que puede encontrarse en distintos tamaños; c) cristales de cuarzo de color blanco y negro; d) biotita que puede observarse con mucha mayor facilidad en comparación a las otras canteras, debido a que su cantidad es mucho mayor. Fuente: Elaboración propia



Petrografía de la RSE, cuya mayor parte que se observa es su matriz vítrea, a) lo que le confiere el término de riolita; b) cristales de plagioclasa en forma de líneas de macla y zonadas; c) pequeños fenocristales de feldespatos; d) cuarzos blancos. En este caso la biotita es prácticamente nula. Fuente: Elaboración propia



Petrografía de la CAM donde se observa: a) matriz vítrea casi en su totalidad, con algunas arcillas representadas con los pequeños puntos blancuecinos; b) plagioclasas en forma de líneas de macla; c) algunos fenocristales dispersos de feldespatos. Fuente: Elaboración propia

Caracterización física de las canteras

Los resultados derivados de la caracterización física de las cinco variedades de piedra cantera son presentados en la siguiente tabla. Como se puede observar, la Cantera Rosa de Mitla (CRM) es la piedra que presenta las mejores características físicas con respecto a las demás variedades de piedra. De la misma manera, los resultados revelaron que la CRM presentó mayor resistencia a la compresión (349 kg/cm²) y menor porcentaje de absorción (5.7%). En contraste, la Cantera Rosa de Suchilquitongo (RSE) y la Cantera Amarilla de Etla (CAM) presentaron menores valores de resistencia a la compresión (184 y 147 kg/cm²) y valores de absorción de 16.0 % y 13.6%, respectivamente.

Cabe destacar que los valores de absorción y peso volumétrico son parámetros que están íntimamente relacionados con las propiedades de resistencia y durabilidad de los materiales, debido esencialmente a la correlación que existe entre la porosidad y los niveles de absorción y transpiración de la humedad. Esto promueve la intrusión de especies agresivas promotoras del deterioro en la matriz de los materiales, como el dióxido de carbono (CO₂), el dióxido de azufre (SO₂), el óxido de nitrógeno (NOx), los cloruros (Cl-), entre otros.¹¹ Ante esto, es posible inferir que las rocas que presentan los valores más altos de absorción son las que tienen mayor cantidad de poros en su interior y, por lo tanto, una menor durabilidad y resistencia. Dicha hipótesis se encuentra en total concordancia con los resultados observados en los análisis petrográficos y mineralógicos, donde se observó que la CRM posee un porcentaje de 10% de cristales de cuarzo, lo que podría influir en su mayor densidad y resistencia a la compresión con respecto a las demás variedades de piedra analizadas. En contraste, las canteras RSE y CAM presentaron valores menores de resistencia a la compresión de 147 y 184 kg/cm² respectivamente, se puede inferir, es una consecuencia de los contenidos mínimos de cuarzos y nula presencia de biotita que presenta este tipo de piedras.

11 Ver: Rosa María Esbert, Modesto Montoto, Jorge Ordaz, "Rocks as Construction Materials: Durability, Deterioration and Conservation", *Materials of construction* 74 (1991): 113-127; ICCROM, Unesco, WHC, *Conservation of Architectural, Historic Structures and Material Salts*, vol. 2. ARC Laboratory Handbook (Roma: iccrom, 1999), consultado el 30 de junio de 2019, https://www.iccrom.org/sites/default/files/ICCROM_14_ARCLabHandbook00_en.pdf; Ismail Badawy, "Environmental Deterioration and Conservation of Monumental Basalt, Egypt", *Assiut University Bulletin for Environmental Researches* 7(1) (2004).

Resultados de la caracterización de las propiedades físicas de los cinco tipos de piedra			
Nomenclatura	Densidad * kg/m ³	Absorción * %	Resistencia a la compresión* kg/cm ²
VMA	1595	15.5	201
CVS	1701	8.9	272
CRM	2249	5.7	349
RSE	1607	13.6	147
CAM	1535	16.0	184

* Valor promedio de cinco especímenes (réplicas) probados en condiciones similares.
Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que los resultados de cuantificación del pH presentados en la tercera tabla revelaron que los cinco tipos de cantera evaluadas tuvieron valores iguales o inferiores a 10.0, por lo que podrían considerarse como piedras con una relativa baja alcalinidad. Esta condición es un factor que puede ser determinante en las propiedades de durabilidad de las piedras. Dicha inferencia se basa en el hecho de que diversos agentes de degradación, existentes en la denominada lluvia ácida, al combinarse con el agua se diluyen y transportan a través de la estructura porosa de los materiales, lo que tiende a desencadenar reacciones químicas indeseables que causan exceso de acidez en rocas con bajos niveles de pH, y con ello se acelera su deterioro y consecuente destrucción.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente programa experimental, se pueden emitir las siguientes conclusiones generales:

Las pruebas mineralógicas ejecutadas mediante fluorescencia de rayos X permitieron conocer los porcentajes de los diferentes compuestos químicos que conforman las cinco variedades de roca. Los resultados revelaron que las canteras analizadas están compuestas predominantemente por aluminosilicatos, con un 13% de Al_2O_3 y un 69% de SiO_2 en promedio.

Los análisis petrográficos mostraron que los elementos predominantes en la composición mineralógica de las rocas analizadas fueron el cuarzo y la biotita, los cuales les confieren las características estructurales propias de una roca volcánica. En adición, la biotita también es el mineral que de manera individual tiene influencia directa en la resistencia a la compresión; de este modo, le concede a la Cantera Rosa de

Mitla un valor de resistencia de 349 kg/cm², en contraste con los 147 kg/cm² obtenidos con la Cantera Rosa de Suchilquitongo, cuyo contenido de biotita es prácticamente nulo. Sin embargo, otro parámetro que también debe considerarse para tener buena resistencia a la compresión es la relación de heterogeneidad entre la matriz y los fenocristales presentes en cada roca. Por ello, nuevamente la Cantera Rosa de Mitla cumple esta condición, al tener entre 5% y 55% de matriz vítrea, cuyo porcentaje restante es cubierto entre feldespatos, plagioclasas, cuarzo y biotita de tamaños variables, incluyendo fenocristales.¹²

Los resultados obtenidos mediante la caracterización física de las canteras permitieron concluir que la Cantera Rosa de Mitla presenta el menor porcentaje de absorción de agua (5.7%), seguida por la Cantera Verde de San Agustín (8.9%). Dichos resultados se atribuyen a sus contenidos en óxido de potasio (3.14% y 3.23%, respectivamente) debido a que es un compuesto altamente deliquescente y que además se oxida fácilmente al entrar en contacto con el agua.

Finalmente, los resultados de las pruebas de densidad y absorción en las piedras canteras revelaron que dichas propiedades están altamente influidas por el contenido de biotita, debido a que por sí solo como mineral de mica, la biotita es más densa en comparación al cuarzo. Ante esto, es posible concluir que la Cantera Rosa de Mitla presenta inmejorables características para su uso en elementos estructurales en los procesos de construcción y restauración.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Laboratorio de Materiales, Edificación y Medio Ambiente (LMEM) de la Facultad de Arquitectura 5 de Mayo de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, así como al Ing. David Esponda Ortiz, responsable del Departamento de Mineralogía del Servicio Geológico Mexicano, por el apoyo brindado para la ejecución de pruebas mineralógicas.

12 Ömer Ündül, "Assessment of Mineralogical and Petrographic Factors Affecting Petro-Physical Properties, Strength and Cracking Processes of Volcanic Rocks", *Engineering Geology* 210 (2016): 10-22, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.001>.

Referencias

- AQUINO, Antonio y Fernando Reséndiz. "Canteras oaxaqueñas. ¿Algo más que un material tradicional de construcción?", *Revista Oaxaca. Ciencia y Tecnología* 4-5 (1991).
- ASTM D4262-05. Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.
- ASTM C170/C170M-17. Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- ASTM C127-07. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org.
- BADAWY, Ismail. "Environmental deterioration and conservation of monumental basalt, Egypt", *Assiut University Bulletin of Environmental Research* 7(1) (2004).
- BEST, Myron G. *Igneous and Metamorphic Petrology*. EEUU: Blackwell Publishing, 2003.
- CHAROLA, A. "Stone deterioration in historic buildings and monuments". En *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Suiza, vol. 1*. Estocolmo: Icomos Suiza, 2004: 3-14.
- DE Pablo-Galán, Liberto. "Geochemical Trends in the Alteration of Miocene Vitric Tuffs to Economic Zeolite Deposits, Oaxaca, México", *Applied Geochemistry* 1(2) (1986): 273-285. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(86\)90012-0](https://doi.org/10.1016/0883-2927(86)90012-0).
- DOMÍNGUEZ Bella, Salvador y Diego Antonio Morata Céspedes. "Aplicación de las técnicas mineralógicas y petrológicas a la arqueometría. Estudio de materiales del dolmen de Alberite (Villamartín, Cádiz)", *Zephyrus* 48 (1995): 129-142. Consultado el 24 de junio de 2019, <https://www.researchgate.net/publication/43600690>.
- ESBERT, Rosa María, Modesto Montoto y Jorge Ordaz. "Rocks as Construction Material: Durability, Deterioration and Conservation", *Materiales de Construcción* 41(221) (1991): 113-27.
- GOMÉZ-BARRANCO, Heidy. "Estudio y protección del patrimonio arquitectónico en cantera del centro histórico de la ciudad de Oaxaca de Juárez (México)". Tesis de Doctorado en Conservación de Patrimonio Histórico de la Universidad de Jaén, España, 2018.
- ICCROM, Unesco, whc. *Conservation of Architectural, Historic Structures and Material Salts, vol. 2. arc Laboratory Handbook*. Roma: ICCROM, 1999. Consultado el 30 de junio de 2019, https://www.iccrom.org/sites/default/files/ICCROM_14_ARCLabHandbook00_en.pdf
- LEMAITRE, Roger Walter, editor. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge, Nueva York: Cambridge University Press, 2002.
- NAVARRETE, Marco, Wilfrido Molina, Elia Mercedes, E.M. Alonso-Guzmán, C. Lara-Gómez, J. A. Bedolla-Arroyo, H. Chávez y J. C. Arteaga. "Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura", *Revista ALCONPAT* 3(2) (2013): 129-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i2.49>.
- ORDAZ, Jorge. "Características físicas y alterabilidad de la piedra de Villamayor (Salamanca)", *Materiales de construcción* 33 (190-191): 619-663. Consultado el 24 de junio de 2019, <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/973/1030>.

ÜNDÜL, Ömer. "Assessment of Mineralogical and Petrographic Factors Affecting Petro-Physical Properties, Strength and Cracking Processes of Volcanic Rocks", *Engineering Geology* 210, (2016): 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.001>.

UNESCO. "Declaratoria de Patrimonio de la Humanidad 1987", consultado el 25 de junio de 2019, <https://whc.unesco.org/en/list/415>.

Heidy Gómez Barranco

arq.heidy.gb@gmail.com

Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad"

Facultad de Arquitectura 5 de Mayo

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO)

Herwing Zeth López Calvo

(autor de correspondencia)

herwingzeth@gmail.com

Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad"

Facultad de Arquitectura 5 de Mayo

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO)

Elia Mercedes Alonso Guzmán

eliamercedesalonso@gmail.com

Cuerpo Académico "Ciencias, Ingeniería y Tecnología de Materiales para la Construcción"

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)

Perla María Arellano Sosa

asperla_5@hotmail.com

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas

Instituto Politécnico Nacional