

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita

Fitting curves to physical-mechanical characterization data of ignimbrite rock

Marco A. Navarrete-Seras,* Elia. M. Alonso-Guzmán, Wilfrido Martínez-Molina, Hugo L. Chávez-García, Mauricio Arreola-Sánchez, Jorge A. Borrego-Pérez, Cindy Lara-Gómez, Ramiro Silva-Orozco y Carlos A. Júnez-Ferreira.

Para citar este artículo: Navarrete-Seras Marco A., Alonso-Guzmán Elia. M., Martínez-Molina Wilfrido, Chávez-García Hugo L., Arreola-Sánchez Mauricio, Borrego-Pérez Jorge A., Lara-Gómez Cindy, Silva-Orozco Ramiro y Júnez-Ferreira Carlos A., 2023. Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita. Ciencia Nicolaita no. 87, 99-107. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.659>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022

Aceptado: 26 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: marcoantonionavarreteseras@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita

Fitting curves to physical-mechanical characterization data of ignimbrite rock

Marco A. Navarrete-Seras,^{1*} Elia. M. Alonso-Guzmán,^{1,2} Wilfrido Martínez-Molina,¹ Hugo L. Chávez-García,¹ Mauricio Arreola-Sánchez,¹ Jorge A. Borrego-Pérez,¹ Cindy Lara-Gómez,¹ Ramiro Silva-Orozco¹ y Carlos A. Júnez-Ferreira.¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, México

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Arquitectura, Morelia, México

Resumen

La presente investigación se centra en el estudio de las canteras de ignimbrita con las que actualmente se realizan las restauraciones en Morelia, Michoacán, México; asimismo, se obtuvieron resultados de muestras de roca con las que se construyeron algunos edificios y otras de canteras que actualmente se encuentran cerradas. Resulta interesante, que al obtener los datos de las diferentes pruebas físico-mecánicas y compararlas, se obtenga un buen modelo matemático mediante el ajuste de curvas a los datos de las pruebas, lo que permite estimar el $Is(50)$, que es un índice de clasificación mecánica de la roca, obteniendo un coeficiente de correlación múltiple R^2 igual a 0.82 bastante adecuado. Se realizó la prueba de partículas alargadas y lajeadas, permitiendo entender la mecánica de falla del material.

Palabras clave: roca, ignimbrita, ajuste de curvas, pruebas físico-mecánicas, modelo matemático

Abstract

The present investigation focuses on the study of the ignimbrite quarries with which restorations are currently carried out in Morelia, Michoacán, México. In addition, results were obtained from samples of stone used in the construction of some buildings and other quarries that are currently closed. Interestingly, when obtaining the data from the different physical-mechanical tests and comparing them a good mathematical model is obtained by fitting the test data to a curve, which allows estimation the $Is(50)$, which is a mechanical classification index of the stone, obtaining a multiple correlation coefficient R^2 equal to 0.82, which is quite adequate. The test of elongated and slanted particles was carried out, allowing us to understand the failure mechanics of the material.

Keywords: stone, ignimbrite, curve fitting, physical-mechanical tests, mathematical model



1. Introducción

A lo largo del tiempo, el hombre ha trabajado con las rocas. En un principio tuvo la necesidad de tallarlas para obtener instrumentos que le permitieran cazar animales para su alimentación; asimismo, la utilizaron como viviendas: las denominadas cavernas.

Por otra parte, en las construcciones civiles las rocas siempre se han utilizado. Es importante mencionar que una construcción civil consta de superestructura y subestructura —también conocida como cimiento—, esta última transmite las cargas de la estructura al basamento. Para proyectar y construir la parte de la superestructura, es necesario conocer las propiedades de los materiales que serán empleados, ya que el basamento está directamente relacionado con la roca y el suelo, por lo que tal conocimiento es crucial para cualquier construcción.

En la actualidad existen canteras de ignimbrita ubicadas en Michoacán, de donde se extrajeron las muestras conocidas como matriz rocosa, de las cuales se obtuvieron sus propiedades físicas y mecánicas. Parte de estos estudios se engloban en la ingeniería de mecánica de rocas que es una ciencia de ingeniería interdisciplinaria que requiere la interacción entre las ciencias físicas, matemáticas y geológicas con la ingeniería civil, petrolera y minera. La ingeniería de mecánica de rocas existe desde principios de los 50 y se convirtió en una disciplina independiente en los 60 (Aadnøy & Looyeh, 2019).

Los depósitos de flujo piroclástico, conocidos como tobas de flujo de ceniza o ignimbritas, son materiales invaluable para estudios paleomagnéticos, con muchas aplicaciones para fines geológicos y tectónicos (Agrò *et al.*, 2017). Diversos autores han estudiado las ignimbritas, por ejemplo, Pola *et al.* (2012) describieron en detalle las propiedades físicas de algunas rocas volcánicas meteorizadas/alteradas y su variación con el grado de alteración, a la vez que realizaron una serie de pruebas para identificar y cuantificar la degradación progresiva de las propiedades. Cabe señalar que aparte de otras rocas, se realizó el estudio en depósitos de ignimbrita no soldada. Alonso-Guzmán *et al.* (2021) realizaron un estudio de las propiedades físicas y mecánicas de diferentes canteras de ignimbrita de Tlalpujahuá, Michoacán, México. Aygun *et al.*

(2016) estudiaron cuatro tipos de ignimbrita (amarillo claro, amarillo, negro y blanco) y piedra pómez de la región de Ahlat, aplicando el método EPR (Electronic Paramagnetic Resonance, Resonancia Paramagnética Electrónica) para determinar sus propiedades magnéticas. Además, mencionaron que los materiales naturales como las ignimbritas se prefieren comúnmente no solo en lugares históricos, sino también en casas o en diferentes tipos de edificios en todo el mundo. Jeong *et al.* (2021) se centraron en comprender mejor los procesos eruptivos y de depósito de la toba Kusan-dong del Cretácico, que es una ignimbrita silícica de varios metros de espesor y lateralmente extensa en Corea. Özvan *et al.* (2015) revelaron las propiedades mineralógicas, petrográficas, petrofísicas y mecánicas de las ignimbritas frescas, a la vez que determinaron el efecto de los líquenes y la capilaridad en el deterioro de las lápidas selyúcidas de acuerdo con estudios de laboratorio y observaciones de campo. Alonso y Martínez (2003) estudiaron las ignimbritas retiradas de la catedral de Morelia, Michoacán, México, durante una intervención de restauración, obteniendo las propiedades mecánicas, químicas y físicas de los bloques de ignimbrita de las cuatro fachadas y la balaustrada de la catedral, las cuales compararon con las propiedades correspondientes a los bloques “sanos” de canteras cercanas, utilizadas en la actualidad para restauración de monumentos históricos. Korkanç (2013) determinó las propiedades de ingeniería y el deterioro de piedras ampliamente utilizadas en los diferentes edificios históricos en la región de Nigde que forma el límite sur de Capadocia. Para ello tomó muestras de bloques (dos de mármol, dos de travertino, seis de toba, cinco de ignimbrita y uno de andesita) que fueron extraídos —de acuerdo con los permisos obtenidos— de piedras que habían caído de los edificios y que no pudieron ser utilizadas nuevamente como parte de ninguna restauración.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo investigar el índice de carga puntual de algunas canteras de ignimbrita provenientes de diferentes lugares de la región Michoacán, México (Figura 1).

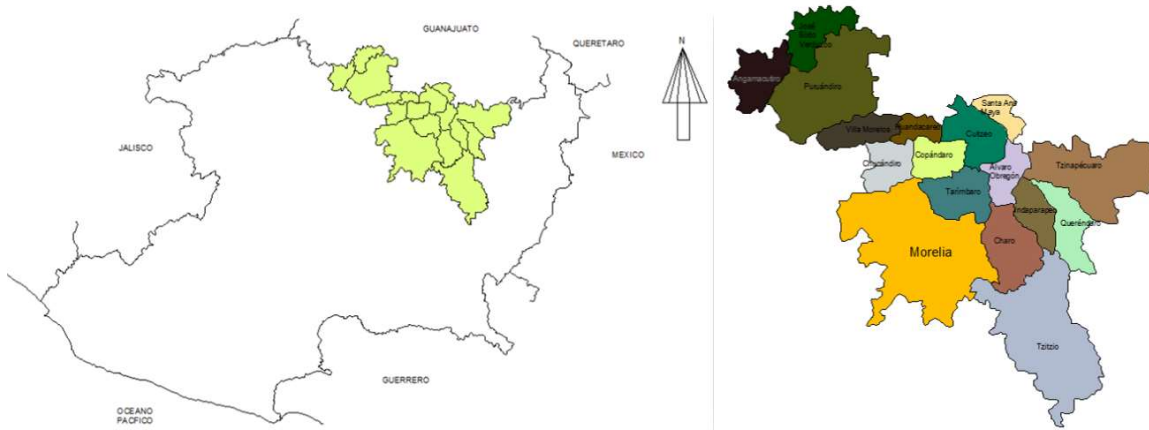


Figura 1. Localización de la región en estudio.

Debido a que Morelia es una ciudad colonial, con frecuencia se utiliza roca como la ignimbrita en la construcción (Figura 2), por esta razón, estudiar diferentes canteras permitirá conocer su comportamiento para determinar cuál es la más adecuada; de igual manera, conocer su compresión uniaxial en fragmentos sin labrar reduce los costos. Para la caracterización mecánica de los fragmentos de roca o material pétreo, que impiden el labrado en muestras cúbicas o cilíndricas y cuya resistencia a compresión uniaxial es muy importante determinar para diseñar y calcular el porcentaje que debe ir inmerso en matrices cerámicas, poliméricas, arcillosas o asfálticas, se utilizó el equipo Point Load, ASTM D 5731-16 (D18.12, 2016), cuya prueba permite clasificar y estimar la resistencia a compresión uniaxial de fragmentos irregulares de roca. Este trabajo presenta los resultados obtenidos de manera experimental en rocas ígneas, naturales y reducidas de tamaño y con casi cualquier morfología,



Figura 2. Roca ignimbrita del Acueducto de Morelia, Michoacán, México.

pero diámetros promedios del orden de hasta cuatro pulgadas.

2. Metodología

Se llevaron muestras de roca de diferentes canteras al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), como se detalla a continuación: Talpujahuá, Arindeo, Cointzio y algunas otras se obtuvieron del parque ecológico, Exconvento de Tiripetío y Ciudad Industrial. A las muestras se les realizaron pruebas físicas y mecánicas, prueba de partículas alargadas y lajeadas. Con los datos obtenidos, se realizó un análisis multivariable para predecir el índice de carga puntual en fragmentos de roca de tres canteras de ignimbrita muy utilizadas en la región.

2.1 Absorción

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas; posteriormente, se dejan enfriar y se pesan (ps = peso seco); una vez hecho esto, las muestras se saturan en un recipiente con agua durante 24 horas como mínimo; después, las muestras se retiran del agua y se secan superficialmente con un lienzo o fra-nela y se pesan (ph) (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.2. Densidad

El objetivo es determinar la densidad de la roca, para ello, el procedimiento consiste en marcar la

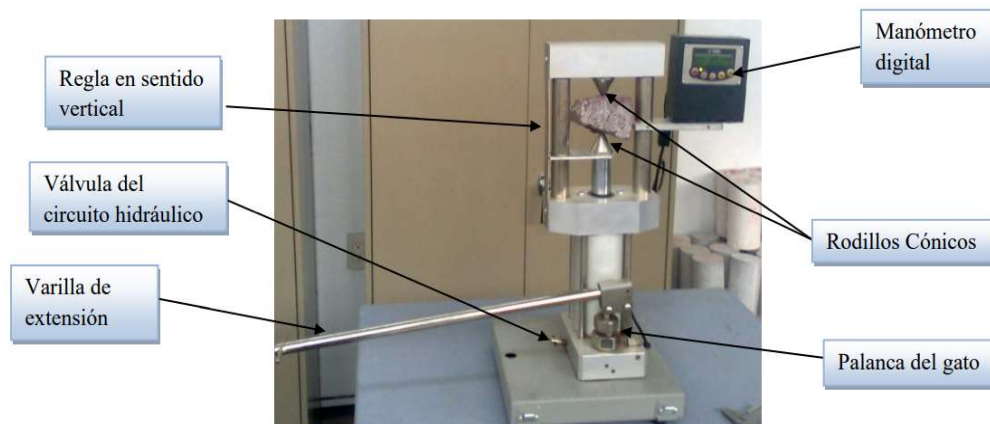


Figura 3. Equipo de ensayo de carga puntual y las partes que lo componen.

muestra o numerarla para identificarla; a continuación se deja saturar en el agua durante un periodo de 24 horas; después se procede a secar superficialmente y se registra su peso húmedo (W en gramos); posteriormente, se llena con agua el picnómetro y se coloca dentro la muestra de roca; finalmente, el volumen de agua desalojado (V en centímetros cúbicos) es medido con una probeta (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.3 Gravedad específica

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura de $110 \pm 10^\circ\text{C}$ durante 24 horas, dejar enfriar y pesar (p_s = peso seco), poner a saturar en agua durante 24 horas y después se pesan lo que permite obtener el peso superficial seco (p_{ss}), después se colocan en una canastilla adaptada en la báscula y se sumergen en agua, finalmente se obtiene el peso sumergido (p_a) (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.4. Ensayo de carga puntual

De acuerdo con la Norma D 5731-16 de la ASTM, el objetivo de esta prueba es determinar la resistencia de las rocas al someterlas a cargas puntuales que se aplican mediante un par de piezas cónicas (Figura 3). Es una prueba de índice y está destinada a ser utilizada para clasificar y caracterizar la roca. Esta prueba de carga puntual se realiza sometiendo una muestra de roca a una carga cada vez más concentrada, hasta que el fallo se produce por la división de la muestra. Este ensayo permite determinar el índice de resistencia de carga puntual no corregido (I_s). Este debe ser corregido al diámetro equivalente estándar $D_e = 50$ mm. Si

el diámetro del espécimen está cerca de 50 mm (como con los núcleos NX), la corrección no es necesaria. El procedimiento para la corrección por tamaño puede ser obtenido gráficamente o matemáticamente por los procedimientos definidos por el ISRM, para obtener el valor para el $I_s(50)$ en MPa (D18.12, 2016).

2.5 Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas, N-CMT-4-04

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas alargadas y lajeadas presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido de la malla N° 4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud (Figuras 4 y 5).

$$C_a = \left(\frac{m_a}{M} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde C_a es por ciento en masa de partículas en forma alargada (%); m_a es masa de las partículas con forma alargada, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda en g; y M es masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 o M_2 según corresponda en g (IMT, 2002).

Se calcula el porcentaje de las partículas en forma de laja, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la Ecuación 2.

$$C_p = \left(\frac{m_e}{M} \right) \times 100 \quad (2)$$



Figura 4. Partículas que pasan por el calibrador de espesores.



Figura 5. Partículas que no pasan por el calibrador de longitudes.

Donde C_p es por ciento en masa en forma de laja (%); m_e es la masa de las partículas con forma de laja, determinada en cada una de las muestras de prueba según corresponda; y M es masa total de la muestra en g (Figura 6). En caso que se presente una variación entre los cálculos del contenido con forma alargada (C_a) igual al 20% o mayor entre una muestra y otra, se considera para el cálculo del resultado de la prueba el promedio de ambas; en caso contrario, se considera el valor que resulta mayor, lo mismo para el contenido de partículas en forma de laja (C_p). Se reportan los contenidos de partículas alargadas y lajeadas, considerando lo indicado anteriormente; asimismo, se reporta como resultado de la prueba el porcentaje en masa de partículas alargadas y lajeadas, como la suma de C_a más C_p (IMT, 2002).

2.6 Ajuste de curvas

Los métodos de ajuste se agrupan en dos tipos: gráficos y numéricos. Los residuos gráficos y los límites de predicción son métodos gráficos que ayudan a la visualización y a la interpretación, mientras que las estadísticas de bondad de ajuste y los límites de coeficiente y confianza, se calculan y dan como resultado medidas numéricas que ayudan al razonamiento estadístico. Después de usar métodos gráficos, se analizó R^2 que es el cuadrado de la correlación entre los valores de respuesta y los valores de respuesta predichos, también llamado el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple y el coeficiente de determinación múltiple (The MathWorks Inc., 2020). El software Curve Fitting Toolbox, de Matlab, utiliza el método de mínimos cuadrados al ajustar datos. El ajuste requiere un



Figura 6. Muestra de Tlalpujahua en fracciones más pequeñas.

modelo paramétrico que relacione los datos de respuesta con los datos del predictor con uno o más coeficientes. El resultado del proceso de ajuste es una estimación de los coeficientes del modelo. Para obtener las estimaciones de coeficientes, el método de mínimos cuadrados minimiza el cuadrado sumado de los residuos. El residual para el i -ésimo punto de datos r_i se define como la diferencia entre el valor de respuesta observado y_i y el valor de respuesta ajustado \hat{y} , y se identifica como el error asociado con los datos.

Para obtener R^2 es necesario obtener la suma de cuadrados debido a un error (SSE) por la Ecuación 3.

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \underline{y})^2 \quad (3)$$

Donde w_i son los pesos y n es el número de puntos de datos incluidos en el ajuste. Los pesos determinan cuánto influye cada valor de respuesta en las estimaciones finales de los parámetros. El R^2 es el cuadrado

de la correlación entre los valores de respuesta y los valores de respuesta pronosticados, también llamado el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple y el coeficiente de múltiplo. R^2 se define como la razón de la suma de cuadrados de la regresión (SSR) y la suma total de cuadrados (SST) (Ecuación 4).

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y} - \underline{y})^2 \quad (4)$$

Donde $SST = SSR + SSE$. R^2 está dada por la Ecuación 5:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

R^2 puede tomar cualquier valor entre 0 y 1, con un valor más cercano a 1 que indica que el modelo presenta una mayor proporción de varianza. En estadística RMSE (Root Mean Squared Error, Error Cuadrático Medio), también se conoce como error estándar de ajuste y error estándar de la regresión. Es una estimación de la desviación estándar del componente aleatorio en los datos y se define como:

$$RMSE = s = \sqrt{MSE} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{SSE}{v} \quad (7)$$

Donde MSE es el error cuadrático medio o el cuadrado medio residual.

Esta estadística utiliza R^2 y lo ajusta en función de los grados de libertad residuales. Los grados de libertad residuales se definen como el número de valores de respuesta n menos el número de coeficientes ajustados m estimados a partir de los valores de respuesta; v es $m - n$, v indica el número de piezas de información independientes que implican los n puntos de datos que se requieren para calcular la suma de cuadrados. Si los parámetros están acotados y una o más de las estimaciones están en sus límites, entonces esas estimaciones se consideran fijas. Los grados de libertad se incrementan con el número de tales parámetros.

Al igual que con el SSE, un valor de MSE más cercano a 0 indica un ajuste que es más útil para la predicción (The MathWorks Inc., 2020).

3. Resultados y discusiones

La Figura 7 muestra los promedios de las muestras de cada cantera para cada una de las pruebas. Se observa que la densidad y la gravedad específica siguen un comportamiento similar. Para la ignimbrita de Tlalpujahua, el porcentaje de humedad de absorción es de 15.67% y tiene un $Is(50)$ alto. Cuando el porcentaje de humedad de absorción es alto, existen resistencias bajas, como la ignimbrita de Cointzio y la ignimbrita de Arindeo. Los bancos de ignimbrita de Tlalpujahua, Cointzio y Arindeo son las rocas que se utilizan actualmente en la región Morelia.

Los resultados del ajuste de la curva a los datos (Figura 8) muestra una correlación entre el índice de carga puntual, el porcentaje de humedad de absorción y la densidad, en este caso se estimó R^2 igual a

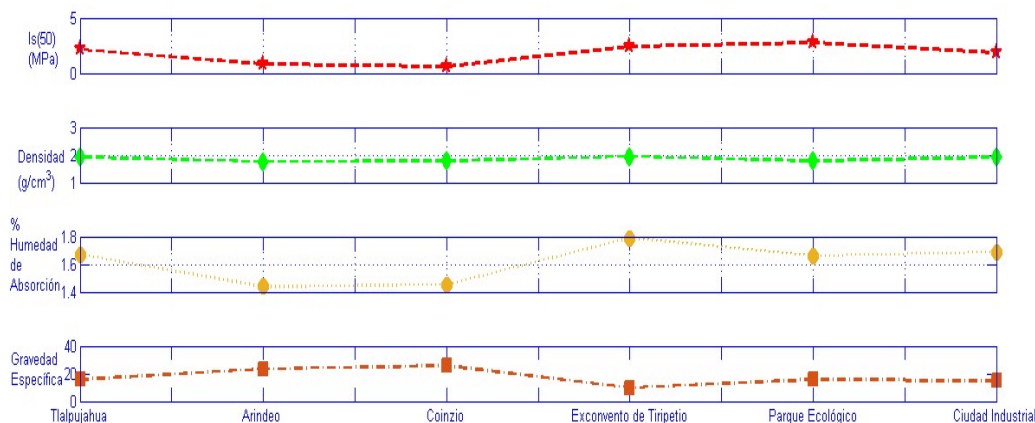


Figura 7. Resultados de las propiedades físicas de las rocas en estudio.

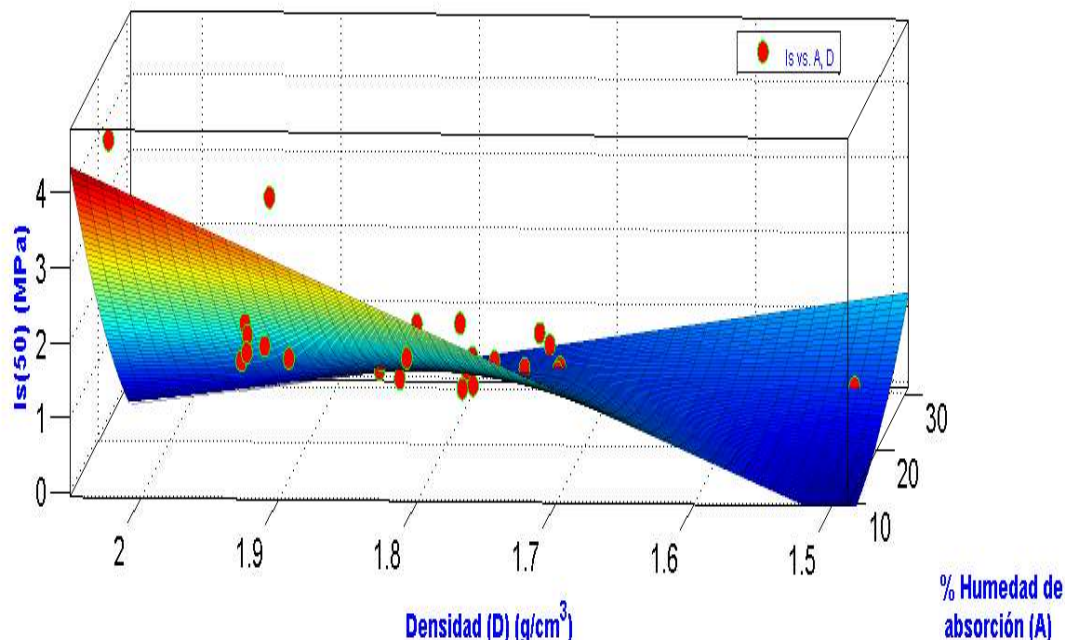


Figura 8. Curva de ajuste polinomial para los datos obtenidos de las pruebas realizadas a las rocas ignimbritas de Tlalpujahua, Arindeo y Cointzio.

0.82, el ajuste se realizó mediante una superficie polinomial debido a que con ella se obtuvo el mejor R^2 y la bondad del ajuste además del modelo (Tabla 1). Para interpretar el coeficiente de correlación se han dado las siguientes pautas generales: valores de R de 0.00 a 0.25 implica que no existe correlación entre ambas variables, valores de R de 0.25 a 0.50 implican una correlación de baja a moderada, valores de R de 0.50 a 0.75 implica una correlación de moderada a buena y un valor de $R \geq 0.75$ implica una correlación de muy buena a excelente (Figueroa Montaña *et al.*, 2014). De acuerdo con lo anterior, el modelo obtenido en este trabajo tiene un coeficiente de correlación de bueno a excelente, debido a que R es igual 0.91 (raíz cuadrada de R^2).

Tabla 1

Modelo matemático para estimar el $Is(50)$ de las ignimbritas de Tlalpujahua, Arindeo y Cointzio.

Modelo matemático	
$Is(50)(A, D) = -19.48 + 0.714A + 12.84D + 0.00325A^2 - 0.5219(A)(D) + 0.1602D^2$	
Bondad de Ajuste	
SSE	5.52
R^2	0.82
RMSE (Error cuadrático medio)	0.47

Tabla 2

Partículas en forma de laja para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua.

Muestra	$M(g)$	$m_e(g)$	$C_p(\%)$
1	2008.2	4774	23.77

Tabla 3

Partículas en forma alargada para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua.

Muestra	$M(g)$	$m_a(g)$	$C_a(\%)$
1	2008.2	293.6	14.62

Las tablas anteriores muestran que para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua existen porcentajes bajos tanto de partículas en forma de laja y partículas en forma alargada (Tablas 2 y 3), lo anterior indica que la mecánica de falla tiene un comportamiento uniforme en la mayoría de las muestras y existen partículas más redondeadas.

4. Conclusiones

Las correlaciones entre el índice de carga puntual, porcentaje de humedad de absorción y densidad, permiten conocer el comportamiento de la roca. Es un modelo matemático aceptable (R^2 igual a 0.82), ya que podemos utilizarlo para estimar el $Is(50)$, sobre todo



porque son rocas que constantemente se utilizan en la restauración de monumentos históricos.

La ignimbrita de Tlalpujahua es la que mejor comportamiento mecánico presenta, ya que como se pudo ver en la Figura 7, la densidad fue de 2 g/cm³ y *Is*(50) en promedio 2.5 MPa, lo que indica que es una roca que se encuentra en buenas condiciones, sana y no intemperizada.

En cuanto a las partículas alargadas y lajeadas, los resultados indican una mecánica de falla buena; sin embargo, se deben comparar estos resultados con otros materiales pétreos y analizar sus porcentajes en cuanto a partículas alargadas y lajeadas.

Se deben seguir haciendo estudios, ya que la caracterización de la roca nos lleva a conocer su comportamiento mecánico, lo que permite tomar decisiones que lleven a construir y cimentar obras civiles con la mejor calidad, además de dar un panorama geotécnico más amplio sobre los problemas que se presentan en la obra.

La ciudad de Morelia cuenta con numerosos edificios históricos construidos con roca como la ignimbrita; el deterioro de estas edificaciones es evidente debido al paso del tiempo, por lo cual resulta importante conocer las propiedades mecánicas de la roca para realizar las restauraciones y reposiciones, cuidando su funcionalidad y su apariencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a: Proyectos CIC en la UMSNH; CONACYT, Proyecto 321260: Desarrollo de un modelo de producción social replicable para la vivienda y el hábitat; SEP-Prodep; Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Referencias

- Aadnøy, B.S., and Looyeh, R., 2019, “Introduction to Petroleum Rock Mechanics”, in Bernt S. Aadnøy and Reza Looyeh, *Petroleum Rock Mechanics*, Elsevier Inc., pp. 65-76. ISBN 978-0-12-815903-3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815903-3.00006-6>
- Agrò, A., Zanella, E., Le Pennec, J.-L. and Temel, A., 2017, Complex remanent magnetization in the Kizilkaya ignimbrite (central Anatolia): Implication for paleomagnetic directions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 336, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.02.007>
- Alonso-Guzmán, E.M., Navarrete-Seras, M.A., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H.L., Lara-Gómez, C. and García-Perdomo, J.C., 2021, Study of the physical-mechanical properties of igneous stones from Tlalpujahua Michoacan, Mexico: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1150(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1150/1/012021>
- Alonso, E. and Martínez, L., 2003, The role of environmental sulfur on degradation of ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico: *Building and Environment*, 38(6), 861-867. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00023-4)
- Aygun, Z. and Aygun, M., 2016, Spectroscopic analysis of Ahlat stone (ignimbrite) and pumice formed by volcanic activity: *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 166, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.05.018>
- D18.12, A.S., 2015, Standard Test Method for Laboratory Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C127-04. American Society for Testing Materials (ASTM).
- D18.12, A.S., 2016, Standard: D 5731-16. Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.
- Figueroa Montañón, A., Ramírez Sánchez, H.U., and Alcalá Gutiérrez, J., 2014, Introducción a la metodología experimental: *Pearson Educación*.
- IMT, (2002, MMP. Métodos de Muestreo y prueba de Materiales. Capítulo 005 partículas alargadas y lajeadas de materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.
- Jeong, J.O., Ahn, H.-S., Son, M., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2021, Eruptive and depositional processes of a low-aspect-ratio ignimbrite (the Southern Kusandong Tuff, South Korea) inferred from magnetic susceptibility variability: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419, 107374. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107374>
- Korkanç, M., 2013, Deterioration of different stones used in historical buildings within Nigde province, Cappadocia: *Construction and Building Materials*, 48, 789-803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.033>
- Navarro, L., Martínez, W. and Espinoza, A., 2011, Análisis de Materiales, Manual de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales (FIC-UMSNH (ed.)).
- Özvan, A., Dinçer, İ., Akin, M., Oyan, V. and Tapan, M., 2015, Experimental studies on ignimbrite and the effect of lichens and capillarity on the deterioration of Seljuk Gravestones: *Engineering Geology*, 185, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2014.12.001>
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V. and Norini, G., 2012, Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks: *Tectonophysics*, 566-567, 67-86. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.017>
- The MathWorks Inc., 2020, Curve Fitting Toolbox™ User's Guide R2017b.