CORRELACIÓN ENTRE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN ROCAS

M. A. NAVARRETE-SERAS¹, F. J. DOMÍNGUEZ-MOTA², J. G. TINOCO-RUIZ²,
E. M. ALONSO-GUZMÁN³, J. A. GUZMÁN-TORRES¹, R. SILVA-OROZCO⁴

¹ Doctorado en Ciencias en Ingeniería Física F.C.F.M. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² F.C.F.M. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

³ Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070.

⁴ Departamento de Construcción, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron pruebas de absorción, densidad, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, las dos últimas pertenecen a pruebas no destructivas, las cuales confieren ventajas importantes en el estudio de las rocas debido a que se pueden conocer varios parámetros sin necesidad de destruir las muestras. Es así que se estudiaron ocho bancos de materiales pétreos de la región Morelia Michoacán, México, las muestras fueron labradas en cubos de 5cm x 5cm x 5cm y se obtuvieron correlaciones que permiten estimar parámetros de las mismas.

Palabras clave: Rocas; Resistividad Eléctrica; Velocidad de Pulso Ultrasónico.

ABSTRACT

In the present work tests of absorption, density, electrical resistivity and ultrasonic pulse speed were performed, the last two belong to non-destructive tests, which confer important advantages in the study of rocks because several parameters can be known without need to destroy the samples. Thus, eight stone material banks from the Morelia region of Michoacán, Mexico were studied, the samples were worked in 5cm x 5cm x 5cm cubes and correlations were obtained to estimate their parameters.

Keywords: Rocks; Electrical Resistivity; Ultrasonic Pulse Rate.

RESUMO

Neste evidências do papel da absorção, densidade, resistividade elétrica e velocidade do pulso ultrassom foram feitas, os dois últimos pertencem a ensaios não destrutivos, que conferem importantes vantagens em estudar as rochas porque pode conhecer vários parâmetros sem para destruir as amostras. Assim, amostras de oito bancos de materiais de pedra na região Morelia Michoacan, México foram estudados foram talhados cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm e as correlações para estimar obtiveram-se os mesmos parâmetros.

Palavras-chave: Rochas; Resistividade Elétrica; Taxa de pulso ultra-sônico

1. INTRODUCCIÓN

Las pruebas no destructivas en la actualidad son muy utilizadas, ya que se pueden realizar diferentes pruebas sin necesidad de destruirlas. Las pruebas no destructivas que se realizaron en este trabajo fueron velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica (ρ), dichos resultados se correlacionaron y se compararon con sus propiedades físicas.

Hay correlaciones que se han realizado con diferentes pruebas no destructivas, físicas y mecánicas, Popov (2003) encontró una correlación entre la conductividad térmica y la velocidad acústica, la porosidad, la densidad y la resistividad eléctrica para diferentes tipos de roca y describió nuevas relaciones entre la permeabilidad, la conductividad eléctrica y térmica para rocas sedimentarias (Popov, Tertychny, Romushkeevich, Korobkov, & Pohl, 2003); Kahraman (2008) realizó pruebas de velocidad, densidad, porosidad, proporción de vacíos, absorción de agua en peso y velocidad de onda P a diferentes rocas carbonatadas y encontró fuertes correlaciones entre la velocidad de la onda P y todas las propiedades físicas de la roca (Kahraman & Yeken, 2008); Kurtulus (2012) realizó correlaciones estadísticas por análisis de regresión para evaluar las relaciones entre UCS y velocidad del pulso ultrasónico (VPU), índice de carga puntual, módulo de elasticidad estática; porosidad efectiva, peso unitario seco, peso unitario saturado de las muestras de roca (Kurtulus, Bozkurt, & Endes, 2012); Torai and Miri (2015) investigaron las propiedades ingenieriles de dos muestras de dolostona con diferentes grados de deformación tectónica de los sitios de Taormina y Castelmola en Italia y correlacionaron las propiedades físicas y mecánicas de las rocas (Torabi-Kaveh & Miri, 2015); Azimian y Ajalloeian (2015) estudiaron la correlación empírica de propiedades físicas y mecánicas de rocas con velocidad de onda P (Azimian & Ajalloeian, 2015); Fereidoon (2016) estudio las características geotécnicas y las relaciones entre las diversas propiedades físicas y mecánicas de ocho tipos de rocas (Fereidooni, 2016); Debanjan et. al. (2017) correlacionó las propiedades físicas y mecánicas con la resistencia a la fractura en Modo I de las rocas (Debanjan, Singh, Kodikara, & Talukdar, 2017).

En este trabajo se estudiaron diferentes rocas provenientes de ocho bancos de materiales petreos de Morelia, Michoacán, México, se realizaron pruebas no destructivas (VPU y ρ) y se encontró la correlación entre ellas, además se comparó dicha correlación con sus propiedades físicas.

2. METODOLOGÍA

Se estudiaron cubos de roca de 5cm x 5cm x 5cm, cinco bancos con muestras de color oscuro y tres bancos con muestras de color rojizo (figura 1).

Figura 1. Muestras de roca de a) color oscuro y b) color rojizo (Fuente: M.A. Navarrete Seras).

2.1 Pruebas no destructivas

2.1.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

Recientemente, las mediciones ultrasónicas han ido ganando importancia como herramientas no destructivas para evaluar daños estructurales en edificios históricos y obras de arte.

En estos métodos, las mediciones de la velocidad de la onda P (V_p) se correlacionan con el aumento de la porosidad debido a los daños en la estructura de las rocas. Estas correlaciones proporcionan un método para medir el grado de daño estructural debido a la intemperie y el deterioro mediante mediciones indirectas. La prevención de daños y la planificación de reparaciones se pueden realizar sobre la base de dicha clasificación de daños V_p /estructurales.

Las propiedades elásticas de un material sólido y las velocidades sísmicas o acústicas están completamente determinadas por las constantes elásticas (rigidez) (Siegesmund & Snethlage, 2014). Se hicieron las mediciones correspondientes en cubos de roca de 5cm x 5cm x 5cm, la preparación de los especímenes se realizó en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” mediante una cortadora de roca respectivamente.

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9µs; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1µs; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM (figura 2).

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel (ASTM D. , 2008). La velocidad de pulso ultrasónico se obtiene con la ecuación 1.

$$V_p = \frac{d}{t}, \quad (1)$$

donde V_p es velocidad de pulso ultrasónico, km/s, d es la distancia entre transductores, mm y t es el tiempo de tránsito, µs.

2.1.2 Resistividad eléctrica (ρ)

Las rocas se dejan saturando en el agua y posteriormente se secan cubriendo con una franela húmeda antes de iniciar la prueba. Las mediciones se realizaron con un equipo llamado resistómetro que mide resistividad eléctrica marca Nilsson (figura 2). La resistividad eléctrica se puede obtener mediante la ecuación 2 (DURAR, 1997).

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right), \quad (2)$$

donde ρ es Resistividad eléctrica en $K\Omega\text{-cm}$ (ohm-m), R_e es resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en $K\Omega$, A es área transversal del espécimen en cm^2 y L es longitud del espécimen en cm.

Figura 2. Equipo resistividad eléctrica marca Nilsson (Fuente: M. A. Antonio Navarrete Seras).

2.2 Propiedades físicas

2.2.1 Porcentaje de humedad de absorción (ASTM C. , 2012)

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura a $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 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 franela y se pesan (ph = peso húmedo) (Navarro , Martínez , & Espinoza , 2011).

2.2.2 Densidad por medio del picnómetro

El objetivo es determinar la densidad de la roca, el procedimiento consiste en marcar la muestra o numerarla para identificarla, se dejan saturar en el agua durante un periodo de 24 horas, después se procede a secar superficialmente y registrar su peso húmedo (W en gramos), posteriormente se procede a llenar con agua el picnómetro y se coloca dentro la muestra de roca, finalmente el volumen de agua desalojado (V en cm^3) es medido con una probeta (Navarro , Martínez , & Espinoza , 2011).

2.2.3 Gravedad específica

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, dejar enfriar y pesar (ps=peso seco), poner a saturar en agua durante 24 horas y después se pesan lo que permite obtener el peso superficial seco (ps), después se colocan en una canastilla adaptada en la báscula y se sumergen en agua, finalmente se obtiene el peso sumergido (pa) (ASTM C. , 2012).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las relaciones que existen entre las variables equivalen a internarse en el área de la correlación. Con el fin de expresar cuantitativamente hasta qué grado están relacionadas dos variables, es necesario calcular el llamado coeficiente de correlación r. Los valores de los coeficientes de correlación varían entre +1.00 y -1.00. Ambos extremos representan relaciones perfectas entre las variables, mientras que 0.00 representa la ausencia de relación (Figeroa Montaña , Ramírez Sánchez, & Alcalá Gutiérrez, 2014). Después de realizar los estudios antes mencionados se correlacionaron los resultados de velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

Los resultados correlacionados en la figura 1 corresponden a las muestras de color rojizo, en dicha gráfica se muestra una correlación entre la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso ultrasónico en este caso se estimó una $r = 0.73$ y se observó que el comportamiento que correlaciona las dos variables es polinomial. El polinomio es de tercer grado, donde la resistividad es la variable independiente y VPU es la variable dependiente. Es importante hacer notar que los coeficientes se encuentran en los límites de confianza del 95 por ciento y están representados con las líneas punteadas.

Figura 1. Correlación de bancos de materiales pétreos de color rojizo (El Melon, Mascutan y Cerritos) (Fuente: M. A. Navarrete Seras).

En la figura 2 se muestra la correlación de las rocas de color oscuro en este caso se estimó un coeficiente de correlación $r = 0.67$ y también se observó que el polinomio que correlaciona las variables es de tercer orden. Además, se muestran las líneas punteadas que representan los coeficientes con límites de confianza del 95%.

Para interpretar el coeficiente de correlación se han dado los siguientes lineamientos 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 implica una correlación baja a moderada, valores de r de 0.50 a 0.75 implica una correlación moderada a buena y valor de $r \geq 0.75$ implica una muy buena a excelente correlación (Figeroa Montaña, Ramírez Sánchez, & Alcalá Gutiérrez, 2014).

De acuerdo con lo anterior las correlaciones estudiadas en este trabajo tienen un coeficiente de correlación de $r = 0.67$ y $r = 0.73$, por lo tanto, tenemos una correlación moderada a buena.

Figura 2. Correlación de bancos de materiales pétreos de color oscuro (Comanja, Joyitas, Cuenembo, El Tigre, y Huiramba) (Fuente: M. A. Navarrete Seras).

La correlación anterior de moderada a buena, nos indica que tenemos rocas que a pesar de ser un mismo material volcánico tiene diferentes propiedades físicas por provenir de diferentes bancos de materiales pétreos, tal como lo muestra la tabla 1, en la cual se puede observar que la menor resistividad es de 936.02 ohm-m y el menor valor de velocidad de pulso ultrasónico es 1455 m/s correspondiente al banco de materiales pétreos Huiramba. Las rocas con mayores velocidades de pulso ultrasónico son Comanja (VPU=3965m/s) y El Tigre (VPU= 3637 m/s).

Tabla 1. Resultados de propiedades físicas y pruebas no destructivas.

Nombre	% Humedad de Absorción	G.E	D(gr/cm ³)	ρ (ohm-m)	VPU(m/s)
Huiramba(H)	4.45	1.63	1.68	936.02	1455.00
Joyitas(J)	3.31	1.45	1.49	2707.80	3554.00
Comanja (CO)	2.99	1.61	1.71	3241.04	3965.00
Cuenembo(CU)	5.15	1.65	1.72	1108.63	3563.00
Tigre(T)	4.65	1.35	1.44	3661.03	3637.00
Cerritos(C)	6.62	1.46	1.53	1636.73	3547.16
Mascutan(K)	9.51	1.46	1.58	1147.95	3460.44
El Melon(M)	2.69	1.73	1.73	2063.85	3830.18

Figura 3. Comparación de las propiedades físicas de los bancos de materiales pétreos (Fuente: M. A. Navarrete Seras)

La figura 3 muestra claramente los resultados de las propiedades físicas, donde se observa la mayor absorción en el banco de materiales pétreos Mascutan (roca de color rojizo) y Cerritos (roca de color rojizo). Por otro lado, los de menor absorción son el Melon (roca de color rojizo) y Comanja (roca de color oscuro).

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados se puede concluir que la mejor correlación se obtuvo con los bancos de materiales pétreos de color rojizo, sin embargo, ambas correlaciones son moderadas a buenas, esto indica que efectivamente la relación de las variables no tiene buena o excelente correlación, debido a que cada una de las rocas presentan diferentes propiedades físicas.

Las resistividades bajas se dieron en las rocas de Huiramba y Cuenembo, esto indica que permiten fácilmente el paso de la corriente eléctrica.

Por otro lado, la velocidad de pulso ultrasónico está directamente relacionado con las propiedades de la roca y su densidad de acuerdo con los resultados obtenidos. Lo anterior permite clasificar y estimar la calidad de las rocas.

Los modelos obtenidos mediante las ecuaciones de tercer orden ayudan a predecir la velocidad de pulso ultrasónico debido a que la correlación es de moderada a buena. Es importante señalar que los resultados del modelo se deben comparar con las características físicas y mecánicas del material en estudio.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el apoyo de las instalaciones del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

6. REFERENCIAS

- ASTM, C. (2012). *Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and*
- ASTM, D. (2008). *Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*.
- Azimian, A., & Ajalloeian, R. (2015). Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity. *Arab J Geosci*(8), 2069–2079. doi:10.1007/s12517-013-1235-4
- Debanjan, G., Singh, T., Kodikara, J., & Talukdar, M. (2017). Correlating the Mechanical and Physical Properties with Mode-I Fracture Toughness of Rocks. *Rock Mech Rock Eng*(50), 1941–1946. doi:10.1007/s00603-017-1196-0
- DURAR. (1997). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión En Estructuras de Hormigón Armado*. España : CYTED, Red temática XV.B- Durabilidad del Hormigón.
- Fereidooni, D. (2016). Determination of the Geotechnical Characteristics of Hornfelsic Rocks with a Particular Emphasis on the Correlation Between Physical and Mechanical Properties. *Rock Mech Rock Eng*(49), 2595–2608. doi:10.1007/s00603-016-0930-3
- Figeroa Montañón, A., Ramírez Sánchez, H., & Alcalá Gutiérrez, J. (2014). *Introducción a la metodología experimental* (Primera ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Kahraman, S., & Yeken, T. (2008). Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity. *Bull Eng Geol Environ*(67), 277–281. doi:10.1007/s10064-008-0139-0
- Kurtulus, C., Bozkurt, A., & Endes, H. (2012). Physical and Mechanical Properties of Serpentinized Ultrabasic Rocks in NW. *Pure Appl. Geophys*(169), 1205–1215. doi:10.1007/s00024-011-0394-z
- Navarro, L., Martínez, W., & Espinoza, A. (2011). *Análisis de materiales* (Tercera ed.). Morelia, Michoacán : Libro de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales, FIC-UMSNH.
- Popov, Y., Tertychny, V., Romushkevich, R., Korobkov, D., & Pohl, J. (2003). Interrelations Between Thermal Conductivity and Other Physical Properties of Rocks: Experimental Data. *Pure appl. geophys*(160), 1137–1161.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2014). *Stone in Architecture Properties, Durability* (Fifth ed.). Springer.
- Torabi-Kaveh, M., & Miri, M. (2015). Discussion on “Correlation Between P-Wave Velocity and Physical–Mechanical Properties of Intensely Jointed Dolostones, Peloritani Mounts, NE Sicily”. *Rock Mech Rock Eng*(48), 1745–1747. doi:10.1007/s00603-015-0768-0