

Medición de resistividad eléctrica de un suelo característico de Morelia, Michoacán, considerando el efecto de la compactación

Luz Martínez J.C., Arregue Rocha J.E., Chávez Negrete C. y Equihua Anguiano L.N.

Maestría en Infraestructura del Transporte, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

Resumen

En varios países se han llevado a cabo estudios aplicando el principio de la resistividad eléctrica, con el fin de establecer correlaciones que permitan obtener bajo un sistema estandarizado, las propiedades físicas y mecánicas de los suelos como una opción alterna a las pruebas tradicionales de la geotecnia. En este trabajo se realizaron experimentaciones de resistividad eléctrica en un limo arenoso con grava, el cual es un material típico de la Ciudad de Morelia, Michoacán y que es comúnmente utilizado para la construcción de las capas de los pavimentos construidos en México. Esta técnica de exploración indirecta se aplicó con la finalidad de calibrar y estudiar los resultados obtenidos por los efectos de la compactación en las propiedades del material. Así, una de las variaciones desarrolladas en esta investigación es la consideración de la compactación de la muestra, la que en general no es considerada en los estudios actuales. Para evitar

los efectos del molde tradicional usado en la prueba de compactación "Proctor", se introdujo un molde fabricado, lo suficientemente resistente para soportar diferentes energías de compactación y de material aislante para realizar la lectura de las resistividades eléctricas sin alterar las muestras compactadas. Los resultados muestran que hay una buena relación entre el contenido de agua, la resistividad eléctrica y la masa seca volumétrica máxima. La aplicación de estos estudios permitirá obtener resultados rápidos en la práctica de la ingeniería.

Palabras clave. Resistividad eléctrica, limo arenoso, grado de compactación, contenido de agua.

Abstract

Resistivity electrical measure to a typical soil from Morelia, Michoacán, considering the compaction effect

In several countries have been carried out studies applying the principle of electrical resistivity, in order to establish correlations that allow to obtain, under a standardized system, the physical and mechanical properties of soils as an alternative option of the traditional tests of the geotechnics. In this work, electrical resistivity experiments were performed in a sandy lime with gravel, which is a typical material of the city of Morelia, Michoacán and is commonly used in the construction of the layers of the pavements in Mexico. This indirect exploration technique was applied in order to calibrate and study the results obtained by the effects of compaction on the properties of the material. Thus, one of the variations developed in this research, is the consideration of the compaction of the sample, which in general is not considered in current studies. To avoid the effects of the traditional mold used in the "Proctor" compaction test, a manufactured mold was introduced, with a strong enough to withstand different energies of compaction and insulating material to read the electrical resistivity without altering the compacted samples. The results show that there is a good relationship between the water content, the electrical resistivity and the maximum dry volumetric mass. The application of these studies would allow to obtain fast results in the practice of engineering.

Keywords: Electrical resistivity, lime sandy, compaction degree, water content.

1. Introducción

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación de los mismos. Para medir la resistencia, la compresibilidad, las relaciones esfuerzo-deformación, la permeabilidad o la flexibilidad de los suelos, se requieren pruebas relativamente especializadas y costosas que, además, suelen requerir un tiempo de ejecución demasiado largo para controlar un proceso de compactación que avance de manera normal (Rico y Del Castillo 1976). Lo anterior se podría facilitar utilizando las mediciones de resistividad eléctrica en laboratorio como un control del proceso de compactación.

Las mediciones de resistividad eléctrica en laboratorio de un suelo bajo un sistema estandarizado, se realizan principalmente para determinar qué tan corrosivo es el suelo considerando las normas (AASHTO T 288 2012, ASTM G187 2018 y BS 1377-3 1990), pruebas que generalmente se usan para determinar el grado de afectación que pueden tener los materiales estructuralmente. En varios países se han hecho investigaciones con el objeto de establecer relaciones entre las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y las mediciones de resistividad eléctrica, sin que hasta el momento se tengan resultados totalmente incluyentes (Bryson & Bathe, 2009), por lo que se considera importante continuar con este tipo de estudios. Así mismo Gunn et al. (2015) realizaron una investigación con el fin de monitorear el contenido de agua a través de mediciones de resistividad eléctrica para identificar áreas de fallas progresivas en terraplenes, con el fin de lograr una compresión del comportamiento de la resistividad eléctrica se combinaron mediciones de campo y de laboratorio.

En este trabajo se realizaron experimentaciones de la resistividad eléctrica en un suelo clasificado como limo arenoso (ML), con la finalidad de medir la resistividad eléctrica del suelo que se presenta al tener diferentes grados de compactación Proctor, debido a que este suelo es frecuentemente empleado en la construcción de capas para estructuras de carreteras. Se eligió utilizar este método indirecto, debido a la importancia que representa el contenido de agua en los diferentes grados de compactación requeridos en la práctica de carreteras en México.

La resistividad eléctrica (Del Valle, 2007; González Vallejo et al., 2004) de un material se define como su resistencia en ohmios, entre las caras opuestas de un cubo unitario para un cilindro conductor de resistencia (δR), longitud (δL) y área

transversal (δA) (Fig. 1). La resistividad (ρ) está dada por la Ecuación (1) y propuesta por Kearey et al. (2002).

$$\rho = \frac{\delta R * \delta A}{\delta L} \quad (1)$$

donde:

- ρ es la resistividad eléctrica en $\Omega \cdot \text{cm}$;
- δR es el conductor de resistencia en Ω ;
- δL es la longitud en cm ;
- δA es el área transversal cm^2 .

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional (SI) es el ohm·metro u ohm·cm y la recíproca de la resistividad se denomina como conductividad (unidad: siemens·metro).

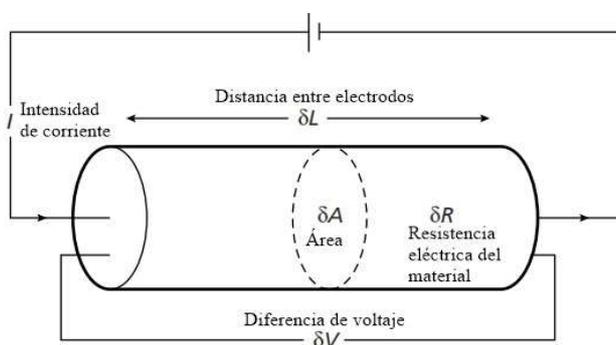


Figura 1. Parámetros usados en la definición de la resistividad (Kearey et al., 2002).

La resistividad en los suelos es una de las propiedades físicas más variables y depende de su naturaleza, condiciones ambientales, concentración de sales disueltas y del grado de compactación.

Bajo este contexto el objetivo de este trabajo se centró en la determinación de la resistividad eléctrica en laboratorio, considerando muestras compactadas con la energía "Proctor" estándar (Das, 2014; Murthy, 2003; Berry P.L. y Reid D, 1995; Juárez Badillo 1975; Rico y Del Castillo 1976), debido a que es la prueba establecida

en la norma NCMT103/02 para subrasantes de carreteras. La variación introducida para la prueba es el uso de un molde de material aislante, como lo es el PVC, debido a que el molde original (de acero) interfiere en las lecturas de resistividades eléctricas.

2. Materiales y Métodos

Primeramente se determinaron las propiedades índice del suelo en estudio de acuerdo a la norma ASTM D4318-17, para el análisis granulométrico se consideró la norma ASTM D6913/D6913M, la densidad relativa de sólidos del material con la ASTM D854-14 y la prueba de compactación Proctor estándar se basó en la ASTM D698-12e2, lo que permitió caracterizar el material de estudio.

Posteriormente se diseñó un molde para llevar a cabo la compactación del suelo. La ventaja de usar el molde de diseño es la facilidad de tomar lecturas de resistencia eléctrica, posteriormente ésta se convierte en la resistividad eléctrica en cada ensaye de la prueba.

2.1. Suelo de prueba

El suelo utilizado en esta investigación se obtuvo del banco denominado “Las Cruces” que se encuentra ubicado en el km 17+300 de la carretera Morelia-Salamanca y con coordenadas UTM: 2’195,802 Norte y 274,227 Este, que se ubica en la carta topográfica de INEGI (Cuitzeo, Michoacán E14A13).

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba de los límites de Atterberg, el material se clasificó como limo arenoso (ML) y sustentado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo anterior se presenta en la Tabla 1. De acuerdo al análisis granulométrico se deduce que el material es una arena limosa mal graduada con grava (SP) y los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Límites de Atterberg SUCS.

LL (%)	IP (%)	SUCS
33.40	6.30	ML

Tabla 2. Resultados obtenidos de la granulometría según SUCS.

Grava	Arena	Finos	Cu	Cc	SUCS
%	%	%			
28.50	70.00	1.50	18.50	0.80	SP

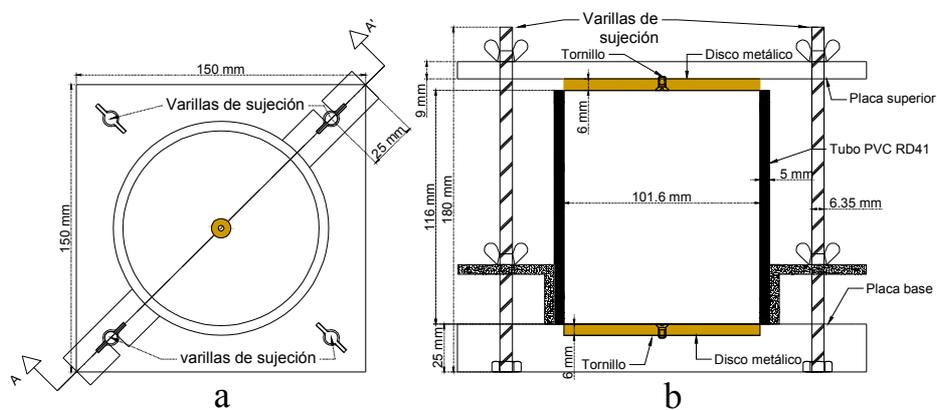


Figura 2. La imagen (a) ilustra la vista superior del molde de compactación; la imagen (b) la sección transversal A-A' del molde de compactación

2.2. Molde de compactación

El molde empleado para determinar la resistividad eléctrica de las muestras compactadas fue diseñado para soportar la energía de compactación sin sufrir deformaciones o ruptura, debido a que el molde original que se sugiere en la norma ASTM D698-12e2 es metálico, por lo que se optó por usar un material aislante (PVC), para que no interfiriera con las lecturas de resistividad. La Figura 2 muestra el esquema del molde. El material empleado fue un tubo de PVC hidráulico RD41 con longitud de 11.60 cm y diámetro de 10.16 cm, el cual soporta una presión de 7 kg/cm², en los extremos del tubo se colocaron dos placas (con electrodos internos) de cobre con un diámetro igual al interior del tubo, el espesor de cada disco de cobre (electrodo) se diseñó considerando el peso del pisón y la altura de caída de la energía Proctor estándar, de esta forma se aseguró que resistiera la fuerza de impacto durante el proceso de la compactación. Los electrodos fueron adaptados a

placas de polietileno para garantizar una posición fija, estos cuentan con un tornillo en el centro para conectar los cables de medición. Para garantizar el contacto entre los electrodos y la muestra de suelo compactada, se colocaron varillas roscadas en la placa base con el fin de garantizar la sujeción. Cabe resaltar que el hecho de haber elaborado el propio equipo, se obtuvo un ahorro de aproximadamente el 70%, en comparación a los manufacturados comercialmente. La Figura 2 muestra una vista superior del molde y la sección transversal del mismo.

2.3. Equipo de medición de resistencia eléctrica

Para las lecturas de la resistividad eléctrica se utilizó un equipo AEMC (Ground Resistance Tester), modelo 4620 (Figura 3a). Para tener certeza que las lecturas fueran correctas se hicieron mediciones en resistores de 50 a 2000 Ω y se compararon con las tomadas por un multímetro digital, esta fue la forma de calibración que se empleó.

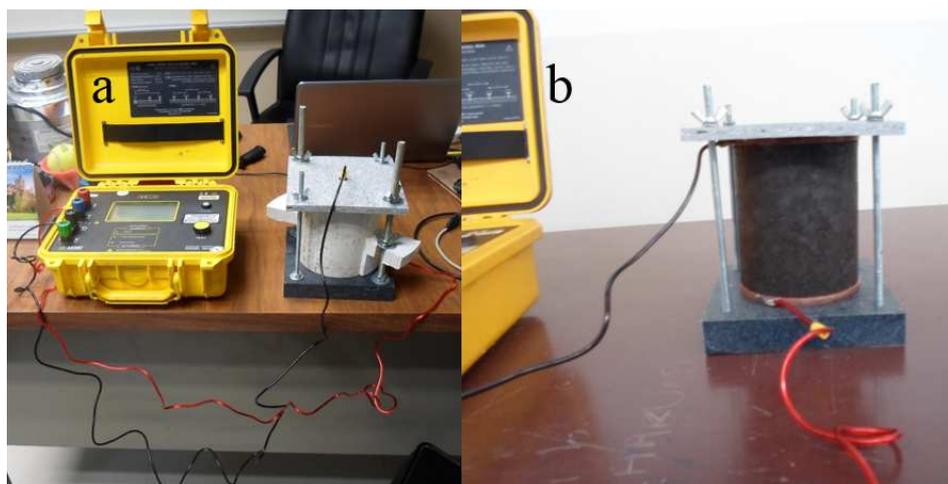


Figura 3. (a) medición con molde y (b) medición sin molde.

2.4. Preparación de muestras y técnica de medición

Las muestras fueron compactadas directamente en el molde diseñado con el mismo procedimiento descrito en la norma ASTM D698-12e2, una vez compactada la muestra se enrasó y se colocó la placa de cobre superior; el contacto entre los electrodos y la muestra se aseguró utilizando tuercas de mariposa en las varillas de sujeción para presionar las placas de cobre. Una vez tomada la lectura se realizó el registro y se determinó el contenido de agua (ω) en cada muestra, de acuerdo con

la norma ASTM D2216-10. Para asegurar que el molde no interfiriera con las mediciones de las lecturas se decidió hacerlas en dos etapas, la primera fue al espécimen dentro del molde de PVC y en la segunda se extrajo la muestra del molde, lo anterior evidenció que no existía diferencia alguna entre los valores obtenidos de la resistividad eléctrica. En la Figura 3 se muestra en (a) la lectura de resistencia eléctrica de la muestra con el molde de PVC y en (b) el espécimen sin el molde.

2.5. Cálculo de la resistividad

Dado que el molde diseñado fue el mismo para todas las mediciones, la sección transversal y la distancia entre los electrodos es la misma; la Ecuación (1) toma la forma de la Ecuación (2).

$$\rho = Rc \quad (2)$$

donde:

ρ es la resistividad de la muestra compactada en Ω -cm;

R es la resistencia eléctrica de la muestra compactada en Ω ;

c es la constante del molde de compactación en cm.

3. Resultados

El molde fabricado junto con el equipo para medir la resistividad eléctrica resultó eficiente para la determinación de la resistividad eléctrica en laboratorio, debido a que no se presentaron diferencias en las mediciones en los especímenes con o sin el molde. Además, el molde diseñado tiene la ventaja de soportar la energía de compactación aplicada. Estos aspectos son importantes ya que con las cajas comerciales no sería posible efectuar la compactación debido a la fragilidad y forma de las mismas, cumpliendo con las especificaciones de la norma ASTM G187-18.

En la Figura 4 se muestran algunas de las curvas de compactación obtenidas con la energía Proctor estándar, la masa seca volumétrica máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), para nuestro caso fue de 1.376 t/m³ y el contenido de agua óptimo de 25%. Para corroborar los resultados se hicieron dos pruebas más, que están representadas con el 25.4% y 27.0% del contenido de agua óptimo ($\omega_{\acute{o}pt}$), así mismo se observa la línea de saturación del 100% (derecha). Lo que confirma que en el rango del 25% del

contenido de agua (ω) las tres líneas coinciden en la forma de la concavidad de las curvas, entonces la ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) determinada es la correcta.

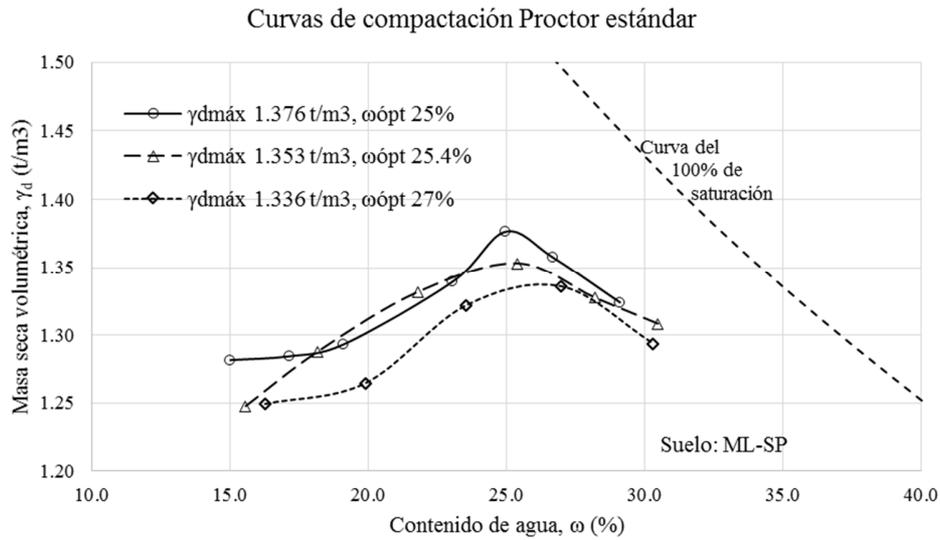


Figura 4. Curvas de compactación del suelo en estudio

En la Figura 5 se presenta la relación entre el contenido de agua (ω) y la resistividad eléctrica (ρ) de la muestra compactada, así mismo la línea vertical punteada representa el 100% de compactación. Además se presentan seis puntos que cada uno corresponde a un grado de compactación, siendo el menor de 93.10% y el máximo de 96.20%. Se puede observar que cuando el contenido de agua está del lado de la rama seca, la resistividad es alta; en cambio del lado de la rama húmeda la resistividad es baja. También se aprecia que la resistividad eléctrica es sensible al contenido de agua (ω), cuando este último es inferior al contenido de agua óptimo ($\omega_{\acute{o}pt}$), la variación de la resistividad es más importante que para el caso en el que el contenido de agua (ω) es mayor que el contenido de agua óptimo ($\omega_{\acute{o}pt}$). Una vez que la muestra alcanza el contenido de agua óptimo ($\omega_{\acute{o}pt}$), la variación disminuye notablemente y prácticamente es independiente del grado de compactación. Así mismo, se aprecia que la forma de la curva tiene una tendencia, prácticamente lineal.

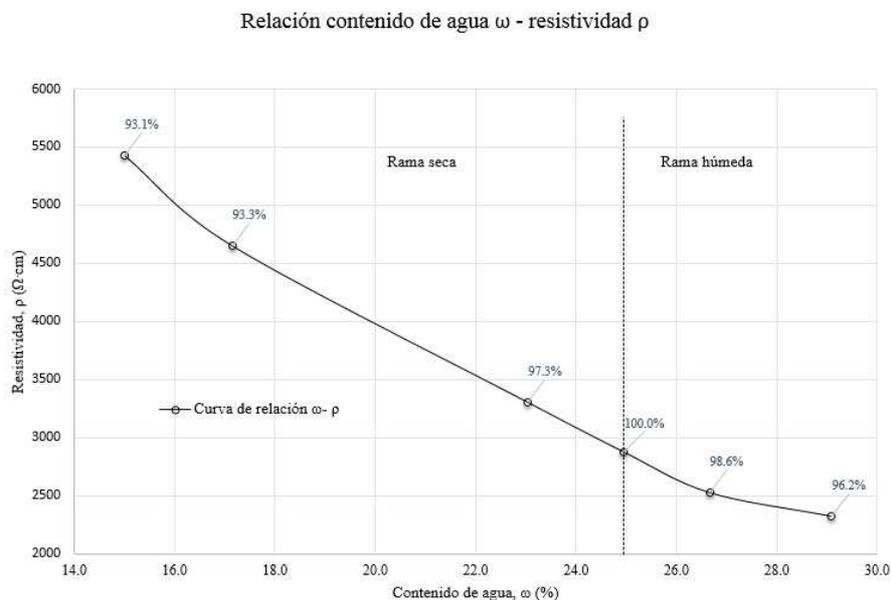


Figura 5. Relación contenido de agua (ω) – resistividad eléctrica (ρ).

Lo anterior confirma que las mediciones de la resistividad eléctrica (ρ) se pueden utilizar para determinar si un suelo fue compactado con el contenido de agua óptimo (ω_{opt}). En la misma Figura 5 se aprecia que cuando el grado de compactación está entre 98% y 100%, la variación de la resistividad eléctrica es muy pequeña. Es muy notorio que en grados de compactación menores al 98%, la resistividad aumenta notablemente, lo que conlleva a que no cumple con la normativa de la compactación. Por lo tanto, un estudio de resistividad eléctrica puede ser una técnica eficiente para evaluar el grado de compactación de un suelo, ya que se realiza rápidamente, siendo además una técnica no destructiva.

El comportamiento observado de la resistividad eléctrica del suelo en estudio, es debido a los cambios estructurales que ocurren durante el proceso de compactación y el efecto de lubricación que produce el agua en las partículas del suelo. Cuando la compactación es realizada del lado de la rama seca el contacto entre las partículas es pobre, por lo que la masa volumétrica seca (γ_d) es baja. Como consecuencia, los vacíos entre partículas son altamente resistivos y por consiguiente el suelo tiene una alta resistividad eléctrica (Abu-Hassanein et. al., 1996). Para el caso contrario, cuando la compactación se realiza del lado de la rama

húmeda, el suelo es remoldeado más fácilmente (Rinaldi et. al., 2002). Lo anterior es debido al efecto lubricante del agua que facilita el contacto entre las partículas disminuyendo el espacio de los huecos con ayuda de la compactación.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la caracterización del suelo y atendiendo las solicitudes de la normativa en México, el suelo de este estudio se podría emplear sin tratamiento alguno en una capa subrasante para cualquier tipo de carretera de acuerdo a la norma NCMT-1-03/02, debido a que los valores máximos permitidos en la norma indica que para del límite líquido (LL) e índice plástico (IP) son de 40 y 12 respectivamente, además no supera el tamaño máximo del agregado definido en 76 mm.

En la misma norma se especifica que el grado de compactación requerido para una capa subrasante de carretera es del 100% ±2, por lo que se decidió variar la masa volumétrica seca (γ_d) en función del contenido de agua (ω), con el fin de observar el comportamiento de la resistividad en el laboratorio, como una prueba adicional a lo observado anteriormente.

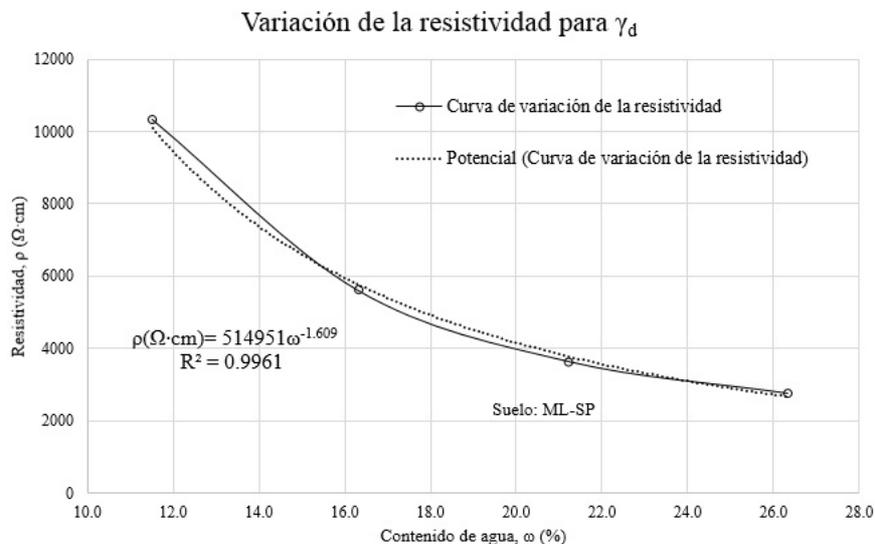


Figura 6. Variación de la resistividad de la masa seca volumétrica (γ_d) en función del contenido de agua (ω).

En la Figura 6 se presenta la variación (línea continua) de la resistividad de la masa seca volumétrica en función del contenido de agua (ω), demostrando que para contenidos de agua bajos la resistividad es alta y en contenidos de agua cerca del

óptimo ($\omega_{\text{ópt}}$) o superior al óptimo, la resistividad es baja. En la misma figura la línea punteada representa una línea de tendencia exponencial y asimismo se muestra la ecuación de la línea de tendencia y el coeficiente de correlación.

La correlación presentada entre la curva de variación y la línea de tendencia indica que para el suelo en estudio la verificación del grado de compactación con el contenido de agua óptimo ($\omega_{\text{ópt}}$), sería sencillo determinarla a través de lecturas de resistividad eléctrica. Ello se observa en la curva de la variación de la resistividad eléctrica que presenta una tendencia parecida a la curva del 100% de saturación.

4. Conclusiones

De la investigación realizada se desprenden las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la caracterización del material estudiado y aplicando la SUCS resultó ser una arena limosa mal graduada (ML-SP). La masa volumétrica seca máxima que se obtuvo aplicando la energía de compactación Proctor estándar fue de 1.4 t/m³. El contenido de agua de 25%.
- El rango de la resistividad eléctrica obtenido fue de 2321 a 5426 ohms-cm y para el contenido de agua óptimo de 2878 ohms-cm.
- El molde diseñado para la determinación de la resistividad en el laboratorio resultó eficiente, ya que se logró la determinación de la resistividad eléctrica de las muestras compactadas en cada ensaye, sin causar interferencia con el equipo de medición. Además permite reproducir la compactación de las muestras en el mismo molde y sin que éstas sufran alteración alguna con respecto al molde Proctor estándar original.
- El contenido de agua (ω) está directamente relacionado con los valores de resistividad (ρ), contenidos bajos de agua producen altos valores de resistividad y contenidos mayores al óptimo o cercanos al óptimo, producen valores bajos de resistividad eléctrica.
- Para verificar el grado de compactación de un suelo se debe conocer previamente la energía de compactación y su relación con los valores de la resistividad eléctrica, determinados en laboratorio de acuerdo a lo propuesto por Abu-Hassanein et. al., (1996) y McCarter (1984) y reafirmado por esta investigación.

- Es necesario realizar más estudios al respecto para presentar una correlación definitiva para el suelo en estudio. También se debe variar la energía de compactación por su posible aplicación en otras capas de la estructura de una carretera ya que la normativa en México exige otros requerimientos.
- En trabajos futuros se podría revisar el efecto de la salinidad de los suelos en la resistividad eléctrica para correlacionar su efecto en la compactación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, las facilidades otorgadas para llevar a cabo esta investigación.

Referencias

- AASHTO T 288. Standard Method of Test for Determining Minimum Laboratory Soil Resistivity. Washington D. C, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- ASTM D4318-17, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D6913/D6913M, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D698-12e2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D2216-10, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- ASTM G187-18, Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- Abu-Hassanein, Z., Benson, C. and Boltz, L. Electrical resistivity of compacted clays. J. Geotech. Eng., Vol. 122, No. 5 (1996), 397-406.
- Berry P. L. y Reid D., (1995). Mecánica de suelos, editorial Mc Graw Hill, pp. 378-390.

- BS 1377-3. Methods of test for Soils for civil engineering purposes. Part 3: Chemical and electro-chemical test. London, UK: BSI, 1990.
- Das Braja M., (2014). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Editorial Cenage, pp. 91-116.
- Del Valle Toledo E. (2007). Introducción a la geofísica. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica, UNAM, 191-205.
- González de Vallejo L. I., Ferrer M., Ortuño L y Oteo C., (2004). Ingeniería Geológica. Editorial Person Prentice Hall, pp. 329-340.
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Glendinning, S. (2015). Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*, 92, 82-94.
- INEGI, (1998), Carta Topográfica de Cuitzeo, Michoacán (E14A13).
- Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A., (1975). Mecánica de suelos (tomo I). Editorial Limusa, pp. 575-593.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. London: Blackwell Science Ltd.
- McCarter, W. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, 34(2), 263-267.
- Murthy V.N.S., (2003). *Geotechnical engineering: Principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. Marcel Dekeer, Inc, pp. 951-985.
- N-CMT-1-03/02, Materiales para Subrasante, IMT Normas, México.
- Rico, A., & Del Castillo, H. (1976). *La ingeniería de los suelos en las vías terrestres* (Vol. 1). México, Limusa.
- Rinaldi, V. A., & Cuestas, G. A. (2002). Ohmic Conductivity of Compacted Silty Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 128(10), 824-835.