

Propiedades elásticas de muestras suelo cemento (G_0 , E_0 y μ) obtenido mediante ensayo a bajos niveles de deformaciones

Gustavo O. Bogado ^{a,b*}, García Dos Santos Enzo ^b, Gómez Balmaceda Francisco ^b, Makaruk Tomás ^b, Winjak Yeferson ^b, Gallardo Ezequiel ^b

^a *Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*

^b *Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil.*

e-mails: gustavo.bogado@fio.unam.edu.ar, franciscogomezbalmaceda97@gmail.com, ergarcia2400@gmail.com, tomasemakaruk99@gmail.com, ezegallardo31@gmail.com

Resumen

En el presente artículo se evalúan las propiedades elásticas de muestras suelo+cemento mediante ensayo de emisión acústica. Se ensayaron probetas cilíndricas de 49 mm de diámetro y 100 mm de altura, compactadas a densidad seca máxima y humedad óptima obtenida del ensayo Proctor, en muestras con y sin cemento. Las pruebas se realizaron en el método del dominio de la frecuencia y se evaluó el Módulo de Young E, Módulo de Corte G y su vez se determinó el coeficiente de Poisson μ , en función de la variación en el contenido de cemento. Los resultados obtenidos son valiosos para caracterizar el suelo con ensayos de rápidos y determinar propiedades para realizar modelaciones numéricas de problemas geotécnicos.

Palabras Clave – *suelo cemento, suelos residuales, propiedades elásticas, emisión acústica*

1 Introducción.

El módulo de elasticidad del suelo es un parámetro fundamental para la determinación de los asentamientos de fundaciones, y análisis de deformaciones en general, ya sea mediante soluciones cerradas basadas en la teoría de elasticidad, mediante soluciones semiempíricas ó por medio de modelos numéricos basados en soluciones de ecuaciones diferenciales mediante diferencias finitas o elementos finitos [1]. Los principales parámetros del suelo que afectan el módulo de elasticidad son: nivel de deformación, contenido de humedad, relación de vacíos, presión de confinamiento, historia de tensiones y estructura interna [2]. Los suelos presentan un comportamiento tenso-deformacional altamente no lineal, por lo que la respuesta de los mismos depende significativamente del nivel de deformación. La variación del módulo de corte de un suelo con el nivel de deformación, es conocida como curva de degradación [3,4]. Las deformaciones por distorsiones menores a 10^{-3} metros son medidas mediante métodos dinámicos (Bender Element, Columna Resonante, métodos geofísicos). Cada proyecto geotécnico posee su nivel de deformación característico, por lo tanto, es necesario realizar un análisis particular para cada caso, según las deformaciones estimadas o esperadas [5]. Estos parámetros son elementales para solucionar cualquier problema relacionado a la ingeniería geotécnica.

[*gustavo.bogado@fio.unam.edu.ar](mailto:gustavo.bogado@fio.unam.edu.ar)

De acuerdo con la teoría de elasticidad podemos relacionar, G_{\max} , E_{\max} y μ con las siguientes ecuaciones.

$$E_{\max} = \rho V_p^2 \quad (1)$$

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$G_{\max} = \frac{E_{\max}}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$E_{\max} = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4)$$

Dónde : ρ = densidad del material, V_p =velocidad de propagación de ondas de compresión, V_s =velocidad de propagación de ondas de corte-

En el caso de Argentina, la norma IRAM 10522, recomienda la incorporación de un 10 % en peso de cemento para un suelo A-7 (según clasificación HRB – Highway Board Research) [8]. Los suelos lateríticos compactados se clasifican como A-7 y A-8, en los cuales el porcentaje de cemento a incorporar es elevado, razón por lo cual, esta recomendación resulta necesaria verificarla mediante ensayos.

En el presente artículo se evalúan los cambios producidos en el Módulo de Elasticidad y Módulo de Corte en mezclas de suelo Tropical y Cemento Portland Normal en diferente proporción de incorporación, realizándose ensayos de emisión acústica mediante análisis de frecuencia. Los resultados indican la variación del Módulo de Elasticidad Longitudinal y Módulo de Corte en función de la cantidad de cemento, y el tiempo de curado de la mezcla suelo cemento. Asimismo, se presenta la metodología utilizada para realizar los ensayos de emisión acústica con base en la Norma ASTM E1876 [9].

2 Materiales y metodología

2.1 Materiales utilizados

Los ensayos se realizaron en probetas cilíndricas de $\phi=49$ mm de diámetro y $L=100$ mm (longitud de la probeta) (Fig.1), respetando una relación de esbeltez $\phi/L=2$, tal como recomienda la Norma. Las muestras fueron compactadas según la densidad seca máxima y humedad óptima obtenida de los ensayos Proctor realizados con anterioridad, según Norma IRAM 10511 (VN E5/93-ENSAYO TIPO I) [10, 11].

Sobre la base de los resultados indicados por el ensayo Proctor, se compactaron en un molde miniatura, en tres capas a densidad controlada. Se realizaron los ensayos a contenidos de humedad, densidad y contenido de cemento.

2.2 Metodología

Se realizaron ensayos de emisión acústica mediante el dispositivo presentado en la Fig. 2. El equipamiento fue diseñado para realizar ensayos no destructivos en pequeñas y medianas deformaciones, según norma ASTM E1876 [9]. El soporte consiste en una estructura de aluminio ligera pero resistente para la ubicación de la muestra a ensayar. La unidad de medida consta de un micrófono, un pie de micrófono y un martillo con una bola esférica en su extremo. Para realizar la prueba, la muestra se ubica en la unidad de soporte, donde los alambres tensados sirven de apoyo en una condición de libre restricción. La prueba básicamente consiste en aplicar impactos con el martillo de bolilla a la muestra en un extremo y en el otro el sonido es grabado por el micrófono, para luego con la utilización de software específico, realizar los análisis y extraer la información. Mediante los modos de vibración es posible obtener frecuencias y calcular de acuerdo a las dimensiones, geometría y densidad, los Módulos de Young (E) y de Corte (G). El software fue diseñado por la Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA) y se denomina UNILastic.



Fig. 1. Probeta compactada a densidad y humedad controlada según ensayo Proctor.

Tabla 1: Datos de la Probeta

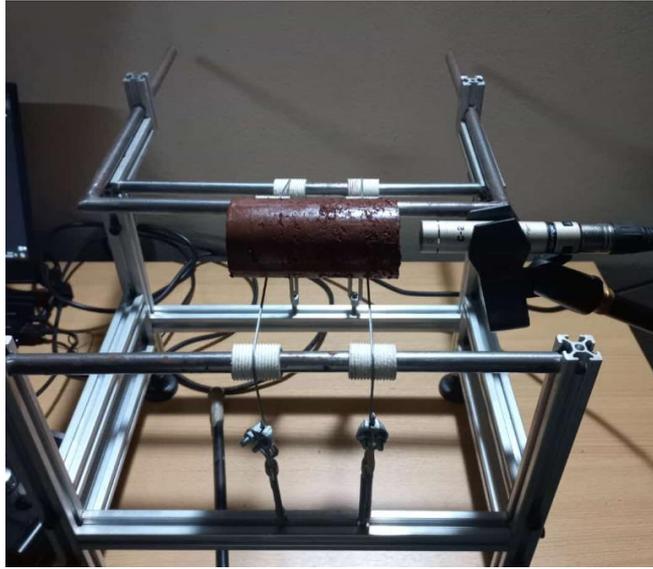


Fig 2. Ensayo de Emisión acústica, montaje del equipamiento empleado

3. Algunos resultados fueron **Resultados y análisis**

En la Fig 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos explicados, realizados sobre probetas de suelo cemento con 21 días de curado, en total se realizaron 10 ensayos en las probetas. En la Fig. 3, se observa cómo se incrementa los módulos en función del contenido de cemento, tanto para el módulo E, como para G. En principio los resultados obtenidos indican que el módulo E_{max} es mayor que el G_{max} , algo observado por otros investigadores. El aumento de los módulos se condice con una evolución lineal, en donde la recta se simula con la ecuación expresada en el gráfico. El contenido de cemento modifica los módulos y se incrementa la rigidez del mismo.

En la Fig. 4 es posible observar el cambio del coeficiente de Poisson en función del contenido de cemento incorporado, donde también se realizó una regresión lineal de los valores ensayados. En este caso no existe una tendencia, si un valor medio entre 0.4 a 0.6. Es decir, para el caso del coeficiente de Poisson no hay una variación o tendencia.

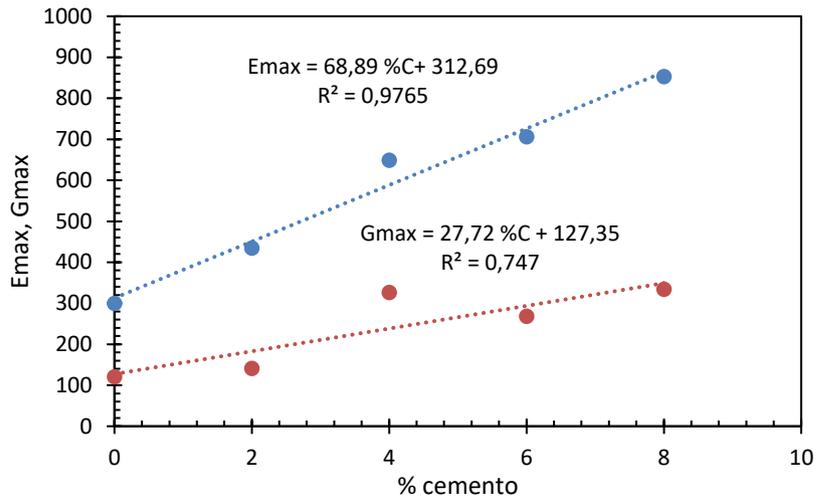


Fig 3. Módulos elásticos en función al contenido de cemento. (color celeste E_{max}, Color marrón G_{max})

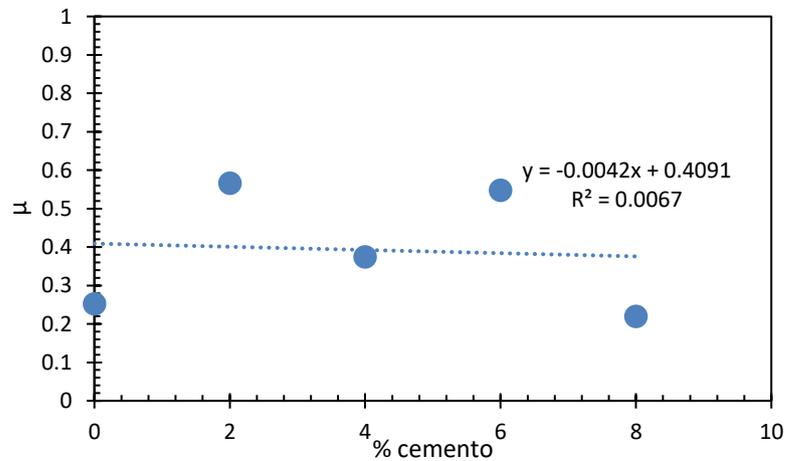


Fig 4. Variación del μ en función al contenido de cemento

4 Conclusiones

En este artículo se evaluaron las propiedades dinámicas de muestra de suelo tropical estabilizado con cemento mediante un método de emisión acústica. Los resultados indican que la metodología utilizada resulta muy útil para determinar propiedades de laboratorio las cuales serían interesantes para ejecutar controles de obra en que se utilice suelo/cemento, midiendo propiedades dinámicas en campo mediante métodos geofísicos y contrastarlos con las mediciones de laboratorio.

Se establecieron los primeros registros de valores de E_{max}, G_{max}, μ de este tipo de mediciones, y sobre todo de los parámetros medidos, dado que en el suelo de la zona no se cuenta con estos datos, lo cual sirve de base iniciar los registros, sobre todo atendiendo a la posibilidad de empleo

de ensayos no destructivos, que permiten trabajar con más de una medición en una sola probeta moldeada, reduciendo las incertidumbre o variables relacionadas a diferentes moldeos.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo económico de la Universidad Nacional de Misiones, y a la colaboración de estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, integrantes de proyectos de investigación en desarrollo en el área. Se agradece especialmente al Dr Iván Gómez Araujo (UNILA) por facilitar la información para el armado del equipamiento utilizado.

Referencias

- [1] Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S. and Mabry, P. (1980). Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil, Geotechnical Engineering Research Report: UCB/GT/80-01, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley
- [2] Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1967). An Introduction to Soil Mechanics, Preliminary Edition.
- [3] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. College of Engineering, University of California.
- [4] Atkinson, J. H., Lau, W. H. W., & Powell, J. J. M. (1991). Measurement of soil strength in simple shear tests. Canadian Geotechnical Journal, 28(2), 255-262.
- [5] Bogado G. O. (2017) Caracterización del Comportamiento Tensodeformacional de Suelos Residuales Inalterados y Compactados del Departamento de Oberá-Misiones- Tesis Doctoral Facultad De Ciencias Exactas Físicas Y Naturales ; Universidad Nacional De Córdoba.
- [6] Consoli, N. C., Fonseca, A. D., Silva, S. R., Cruz, R. C., Fonini, A. (2012). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. Géotechnique, 62(2), 177-183.205.
- [7] Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 133(2), 197-205.
- [8] VN-E4-84. Clasificación de Suelos. Norma de Ensayo Dirección Nacional de Vialidad, 1984, Argentina.
- [9] Standard, A. (2015). ASTM E 1876-01: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.
- [10] VN-E5-93. Compactación de Suelos. Norma de Ensayo Dirección Nacional de Vialidad, 1984, Argentina.
- [11] IRAM 10.511/72 - Mecánica de suelos. Método de ensayo de compactación en laboratorio, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, 1972, Argentina.
- [12] VN-E4-84. Clasificación de Suelos. Norma de Ensayo Dirección Nacional de Vialidad, 1984, Argentina.
- [13] Otani, L. B., & Pereira, A. H. A. (2017). Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso. ATCP Engenharia Física. Ribeirão Preto-São Paulo.