

Evaluación de propiedades elásticas de muestras de suelo-cemento mediante emisión acústica

Bogado Gustavo O.^{a,b*}, Reinert Hugo O.^a, Neudeck Néstor H.^a

^a *Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, CONICET*

e-mails: gustavobogado@fio.unam.edu.ar, hugo.reinert@fio.unam.edu.ar, neudeck@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el presente artículo se evalúan las propiedades dinámicas de muestras de suelo tropical + cemento mediante emisión acústica, sobre probetas de 49 milímetros de diámetro y 100 milímetros de altura, compactadas a densidad seca máxima y humedad óptima obtenida del ensayo Próctor. Los ensayos no destructivos son una herramienta fundamental para aplicaciones de ingeniería civil, debido a sus prestaciones y capacidad de estimar respuesta mecánica sin alteración alguna. Las pruebas se realizaron en el método del dominio de la frecuencia y se evaluó el cambio del Módulo de Young y Módulo de Corte, en función de la variación en el contenido de cemento. Los materiales utilizados son el suelo tropical característico de la provincia de Misiones con mezcla de cemento portland normal en proporción en peso del 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, y 10%. En el artículo se presenta la metodología propuesta y los primeros resultados obtenidos con la aplicación del método.

Palabras Clave – Suelos tropicales, Suelo cemento, Modulo de Young, 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 (Bogado, 2017) [5].

La incorporación de cemento al suelo permite generar propiedades ligantes y mejorar el comportamiento tenso-deformacional a corto y largo plazo. Estas propiedades son necesarias para que las obras de ingeniería, como ser los caminos, obtengan una alta performance y mayor durabilidad. Los parámetros que controlan la resistencia en las mezclas suelo cemento, son la humedad, porosidad (n), cantidad de cemento y la relación volumétrica porosidad/ contenido de cemento [6, 7].

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.

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 utilizado

Los ensayos se realizaron en probetas cilíndricas de $\phi=49$ mm de diámetro y $L=100$ mm (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 Próctor, 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 conforme se detalla en Tabla 1.

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 Próctor.

Tabla 1: Datos de la Probeta.

Ensayo	Densidad [gr/cm ³]	Humedad [%]	Contenido de cemento [%]
PCVS	1.40	32.5	0
PC2%	1.44	31.7	2
PC4%	1.44	30.7	4
PC6%	1.44	30.5	6
PC8%	1.44	30.4	8
PC10%	1.44	28.9	10



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

En este método los modos de vibración de las probetas son fundamentales para determinar las propiedades dinámicas a bajas deformaciones. En la Fig. 3 se indican los modos de vibración para una probeta cilíndrica; en análisis longitudinal, flexional y torsional. Los mismos se obtienen produciendo la excitación mediante impacto con el martillo en diferentes puntos o posiciones de la probeta.

En las probetas cilíndricas se obtuvo el módulo longitudinal y el flexional de una manera sencilla ubicando el adquirente en diferentes puntos de la probeta, sin embargo, para el modo torsional no fue posible obtener esa frecuencia debido a la dificultad de lograr esa deformación con el dispositivo desarrollado. Una vez obtenidas las frecuencias de vibración se calculan los valores de E (Módulo de Elasticidad Longitudinal), G (Módulo de Corte), μ (Coeficiente de Poisson), mediante las siguientes determinaciones.

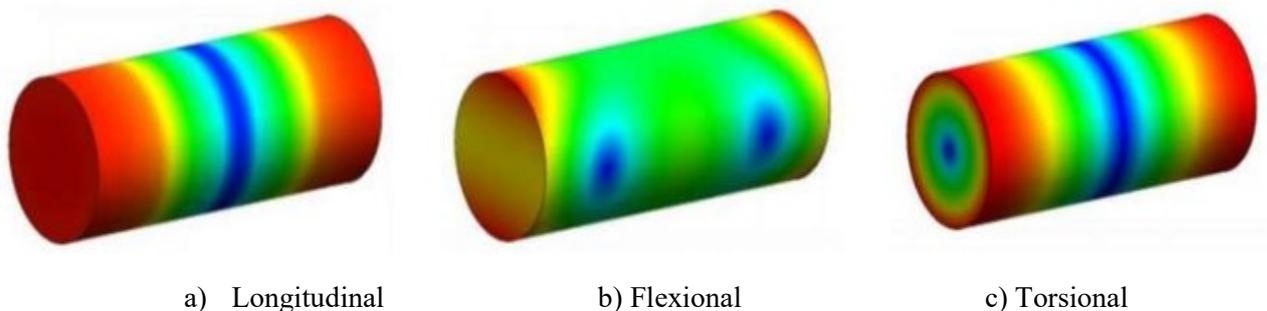


Fig 3. Modos Fundamentales de vibración para una probeta cilíndrica. [8]

$$E = \frac{5.093 L m f l^2}{d^2 K} \quad (1)$$

$$G = \frac{1.6067 L^3 m f t^2}{d^2 \pi} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{G}{2E} - 1 \quad (3)$$

En la Fig. 4 se muestra un resultado obtenido mediante el método descrito anteriormente. Es posible observar las amplitudes en función de la frecuencia de la muestra en donde los picos “L1” y “L2” son la frecuencia de resonancia utilizados para determinar los valores de módulos en la probeta.

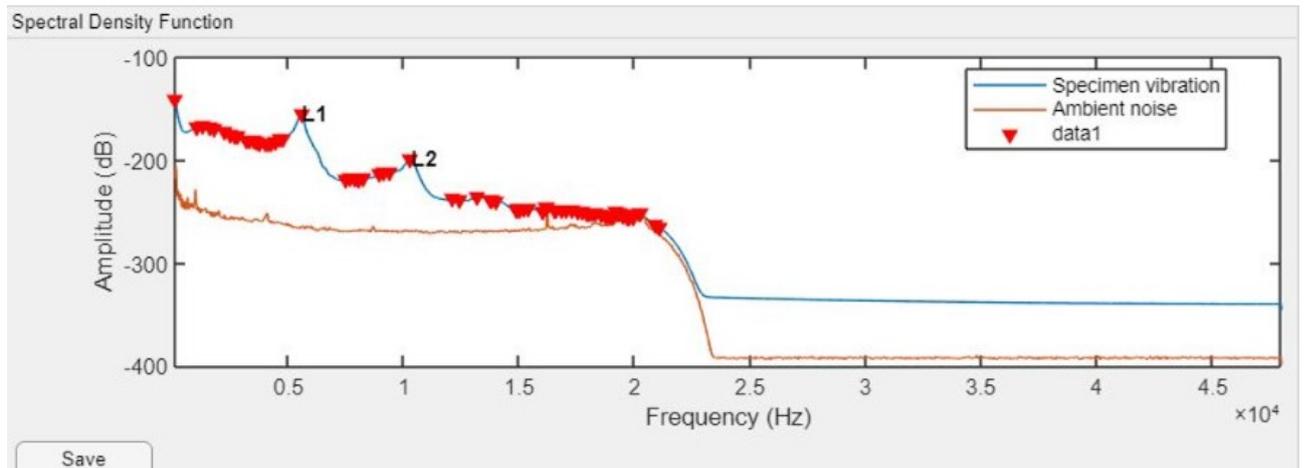


Fig 4. Ensayo de Emisión acústica, imagen de lectura de amplitud de frecuencia.

3 Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig5, 6, y 7. La Fig.5 indica la evolución del módulo de Elasticidad Longitudinal en función del contenido de cemento para 1 y 53 días de curado. Los resultados obtenidos indican que para valores menores al 4% el aumento del Módulo de Elasticidad es muy reducido, y con respecto a mayores porcentajes que el 4% se obtuvo un aumento de forma lineal del módulo de elasticidad.

Esto indicaría que el porcentaje mínimo para obtener una eficiencia en la resistencia y módulo Dinámico se corresponde al 4% de contenido de cemento en peso. Para este caso se utilizó un porcentaje máximo del 10% para reducir los costos que equivalen a la incorporación de cemento.

En la Fig. 6 se muestra la evolución del módulo de Elasticidad en función del tiempo, para los porcentajes de 4 y 10% de contenido de cemento. Los resultados indican que para el caso del 10% de contenido de cemento se logra una mayor pendiente con un aumento del módulo, así como un mejor ajuste de la curva por logarítmica de regresión.

En cuanto a la eficiencia, entendiéndose como la mejora porcentual lograda en el Módulo de Elasticidad del suelo con diferente contenido de cemento respecto del correspondiente al suelo sin cemento, en la Fig. 7 se observa que para porcentajes mayores al 6%, la rigidez alcanzada es superior a ocho veces la resistencia del suelo sin cemento.

Estos valores son muy útiles para la actividad práctica profesional, en la cual se necesita aumentar la capacidad de carga mediante el mejoramiento y la estabilización del suelo. Para el caso del 10% de cemento la eficiencia es mayor a 12.

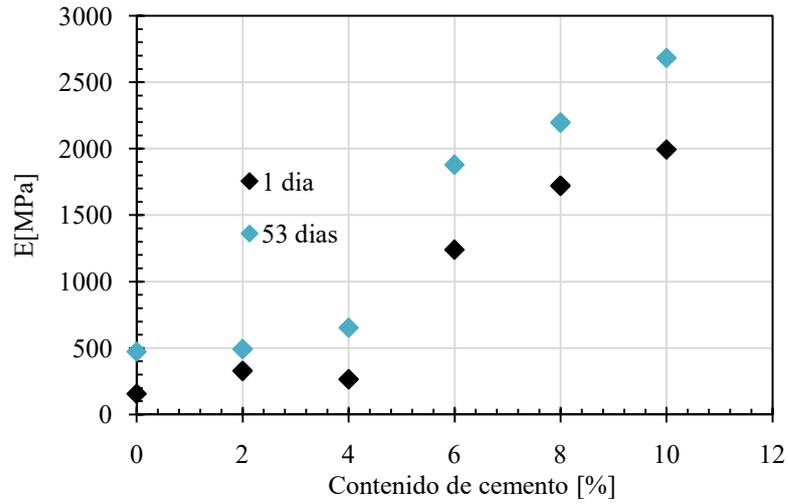


Fig 5. Evolución del módulo de Young en función del contenido del cemento para 1 y 53 días de curado.

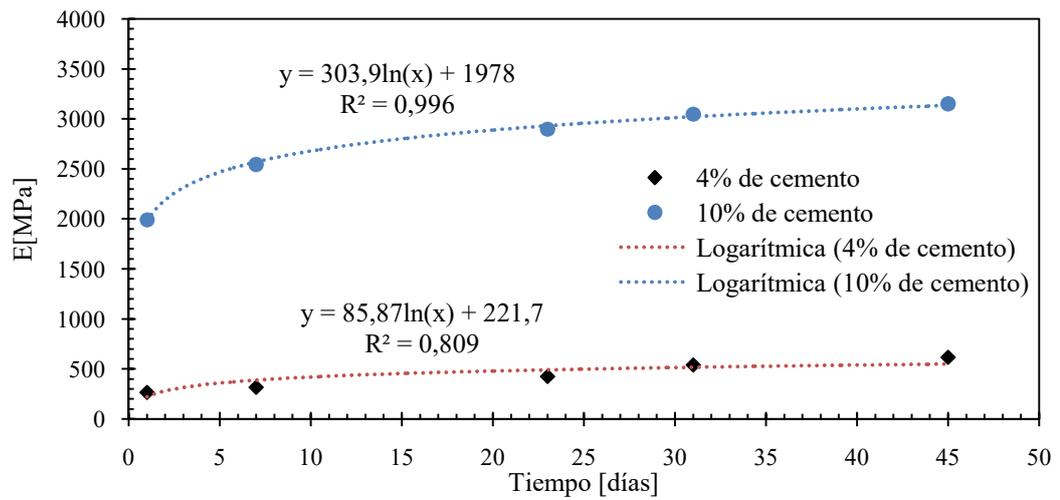


Fig 6. Evolución del módulo de Young en función del tiempo de curado.

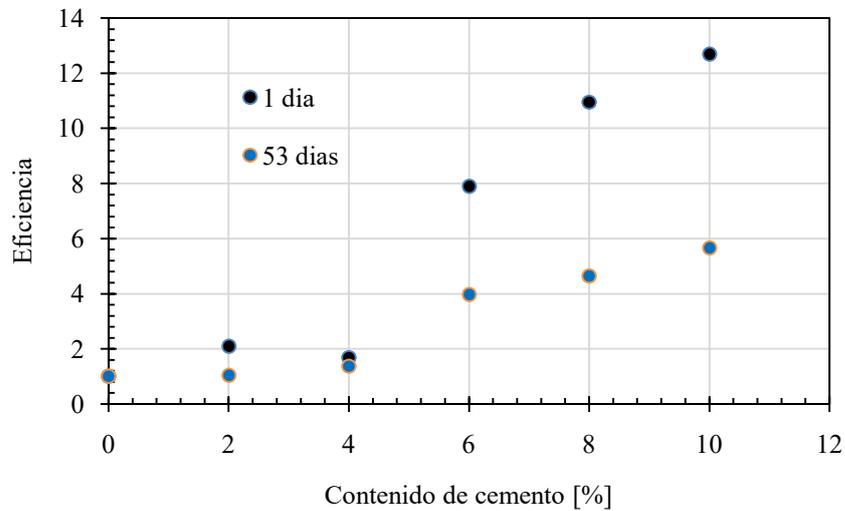


Fig. 7. Eficiencia en el aumento de E en función del contenido de cemento, referido al suelo sin cemento.

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 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 antediendo 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.

En este trabajo se evaluó obtener la variación de las propiedades dinámicas con el tiempo y como futura investigación se trabajara en la obtención del Módulo de Corte G y Coeficiente de Poisson μ , dado que estos parámetros sirven de entrada para el cálculo de deformaciones y asentamientos elásticos en suelos.

La técnica utilizada demostró poder determinar el cambio de rigidez en las muestras de suelo cemento cuando se aumenta el porcentaje de cemento, así como la respuesta en el tiempo cuando se avanza el proceso de curado de las muestras suelo/cemento.

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 Gomez 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.
- [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.