

Sensores de fibra óptica tipo LPG aplicados a la determinación de tensiones y deformaciones en suelos

Use of LPG optical fiber sensors for the measurement of stress and deformation in soils

Luis Mosquera^{1*}, Jesús Basurto¹, Cristiano Cordeiro²

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, Lima-Perú.

²Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Sao Paulo-Brazil.

Recibido : 17/10/2017 Aceptado: 14/03/2018

RESUMEN

En este trabajo se muestra la aplicación de sensores de fibra óptica tipo LPG a la determinación del esfuerzo transmitido y deformación de una muestra de suelo confinado sometido a cargas superficiales. El esfuerzo transmitido fue medido por un sensor de presión LPG mecánico y la curvatura del suelo por sensores LPG permanentes enterrados a profundidades de 0,1m; 0,2m; 0,4m y 0,6m. Suelo arcilla-arenoso característico de la UNICAMP fue depositado en un cilindro de 0,8m de longitud y 0,305 m de diámetro. El suelo fue ligeramente compactado en capas de 0,2m instalándose sobre cada capa un sensor LPG. Cargas superficiales de hasta 227 KPa fueron aplicadas sobre la superficie del suelo midiéndose deformaciones axiales del suelo menores a 3mm por nuestros sensores con sensibilidades del orden de 0,22 mm/dB. Los valores de los módulos de elasticidad para este tipo de suelo fueron determinados a partir del ajuste de las ecuaciones de Bousinessq con los valores medidos por los sensores LPG enterrados. Un módulo de Young de 5,39 MPa y un coeficiente de Poisson $\nu = 0,52$ fueron determinados para este tipo de suelo.

Palabras clave: Redes de período largo en fibra óptica. Sensores ópticos. Esfuerzo en suelos.

ABSTRACT

This paper shows the application of LPG optical fiber sensors to the determination of the transmitted stress and deformation of a sample of confined soil subjected to surface loads. The transmitted stress was measured by a mechanical LPG pressure sensor and the curvature of the ground by permanent LPG sensors buried at depths of 0.1m; 0.2m; 0.4m and 0.6m. Clay-sandy soil characteristic of UNICAMP was deposited in a cylinder of 0.8m in length and 0.30m in diameter. The soil was lightly compacted in 0.2m layers and an LPG sensor was installed on each layer. Surface loads of up to 227 KPa were applied to the surface of the soil, measuring axial soil deformations of less than 3mm by our sensors with sensitivities of the order of 0.22 mm/dB. The values of the modulus of elasticity for this type of soil were determined from the fitting of the Bousinessq equations with the values measured by the buried LPG sensors. A Young's modulus of 5.39 MPa and a Poisson's coefficient $\nu = 0.52$ were determined for this type of soil.

Keywords: Long-period fiber grating; fiber optic sensors; Soil stress.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la transmisión de esfuerzos en suelos sometidos a carga superficial así como de su deformación versus la profundidad es de vital importancia en la realización de trabajos de compactación para edificaciones, en el diseño de pavimentos o para determinar cambios en la porosidad o dureza del suelo a emplearse con fines agrícolas [1-4].

Uno de los primeros modelos de transmisión de esfuerzos en suelos fue desarrollado por Boussinesq en el año de 1885[5], en éste modelo se considera que la transmisión de esfuerzo vertical (σ_z) en el suelo sometido a una carga superficial "q", uniformemente distribuida sobre un disco de radio "a" localizado sobre su superficie (Figura 1), viene dado por la expresión:

* Correspondencia:
E-mail: lmosquera@uni.edu.pe

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \tag{1}$$

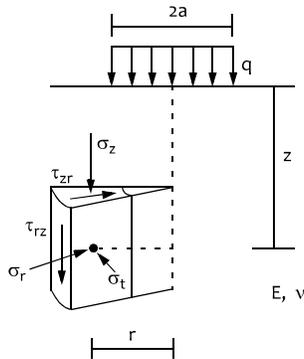


Figura 1. Esfuerzos presentes al interior del suelo (modelo de Boussinesq)

Determinándose, asimismo, la deformación $\xi(z)$ del suelo, en el eje vertical, a partir de:

$$\xi[z] = \frac{(1 + \nu)q}{\pi a^2 \gamma} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \tag{2}$$

En este artículo nosotros mostramos la aplicación de sensores de fibra óptica tipo LPG para la medición del esfuerzo transmitido (σ_z) y la deformación del suelo (ξ_z) arcillo-arenoso, de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP) en Sao Paulo-Brasil, a profundidades de hasta 0,6m. Usando el modelo de Boussinesq determinamos las constantes elásticas del suelo (módulos de Young y de Poisson) a partir del ajuste del modelo teórico con los valores de esfuerzo y deformación medidos por los sensores LPG.

2. LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Para fabricar los sensores de fibra óptica tipo LPG con el rango y resolución de medición adecuada, realizamos primero el cálculo de la distribución de esfuerzos (σ_z) y deformaciones (ξ_z) esperados para el suelo arcilloso-arenoso de la UNICAMP, sometido a cargas superficiales de hasta 227 KPa.

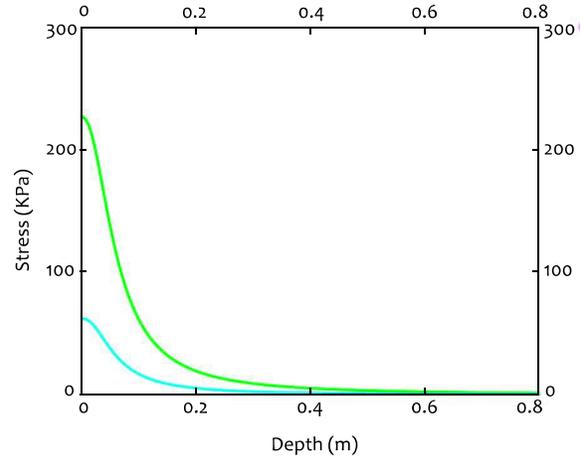


Figura 2. Simulación (Ec. 1) del esfuerzo transmitido por el suelo sometido a cargas superficiales 62KPa y de 227 KPa.

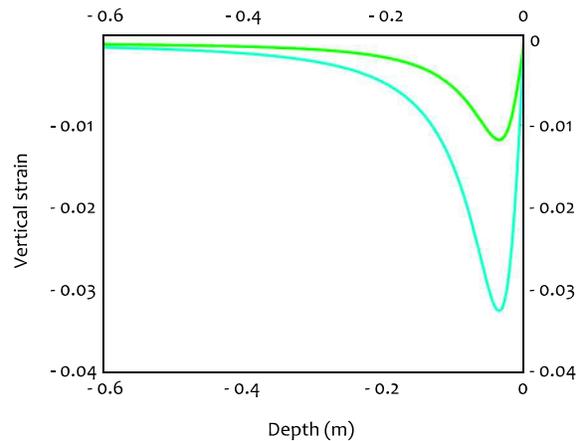


Figura 3. Simulación de la deformación vertical del suelo según la ecuación (2). Valores del módulo de Young $Y = 4.6$ MPa y módulo de Poisson $\nu = 0,5$ fueron usados para el tipo de suelo de la Unicamp [6].

Valores del módulo de Young $Y = 4,6$ MPa y módulo de Poisson $\nu = 0,5$ fueron usados para este tipo de suelo de acuerdo con los valores obtenidos usando otras técnicas [6-8]. Las simulaciones son mostradas en las figuras 2 y 3. Los resultados muestran, para una carga superficial de 227KPa, un esfuerzo transmitido menor al 1% y una deformación del suelo menor al 2% de la deformación máxima a tan solo una profundidad de 0,6m.

2.1 Sensores LPG mecánicos

Determinado el rango de variación del esfuerzo transmitido, nos decidimos por usar sensores LPG mecánicos de 600 μ m de periodo y 15mm de longitud [9-11]. La variación de la transmitancia de este sensor sometido a cargas de hasta 101 KPa es mostrada en la Figura 4a.

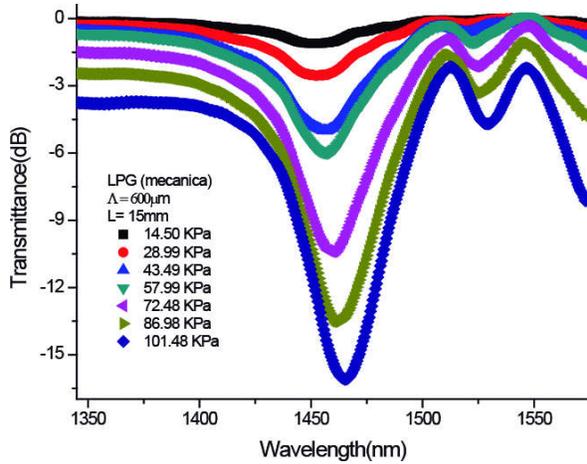


Figura 4a. Cambios en amplitud y fase de la transmittancia del sensor LPG mecánico de fibra óptica sometido a cargas de hasta 101 KPa.

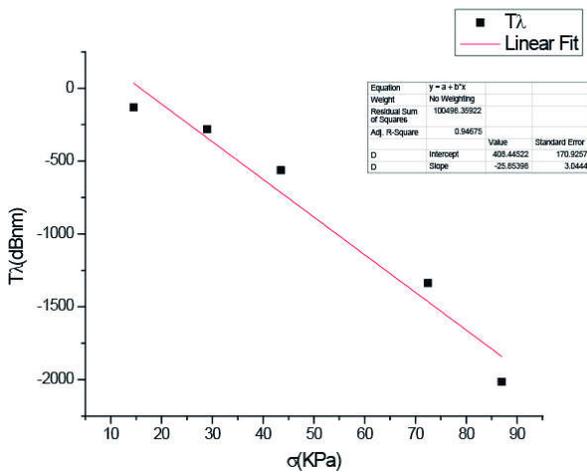


Figura 4b. Se muestra la respuesta lineal del sensor LPG sometido a cargas de hasta 101 KPa.

Una sensibilidad de 25,854 dBnm/KPa es determinada desde el ajuste lineal.

2.2 Sensores LPG grabados con láser de CO₂

La sensibilidad a flexión de las redes grabadas en fibras monomodo con láser de CO₂ y la técnica para determinar su sensibilidad a cambios de curvatura son mostrados en las referencias [12-14]. Nosotros gravamos redes LPG con diferentes sensibilidades afin de no exceder la región lineal de respuesta a curvatura (Figura 5). Las LPGs más sensibles fueron colocadas a mayor profundidad, donde el esfuerzo transmitido y la deformación del suelo presentan los menores valores.

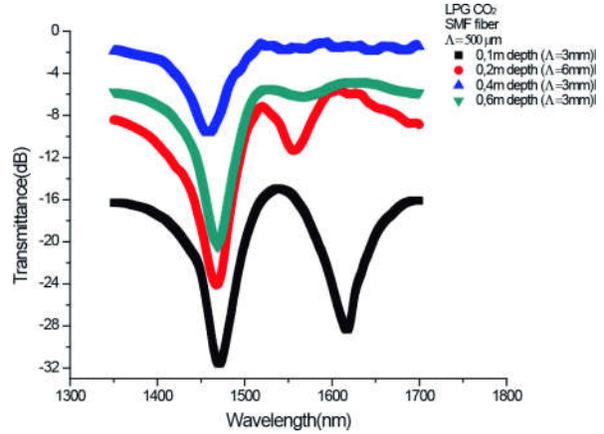


Figura 5. Redes LPG grabadas en fibra monomodo usando un láser de CO₂

La Figura 6 muestra la respuesta a curvatura del sensor LPG (F19). Una sensibilidad de 0,224 mm/dB fue determinada para esta LPG.

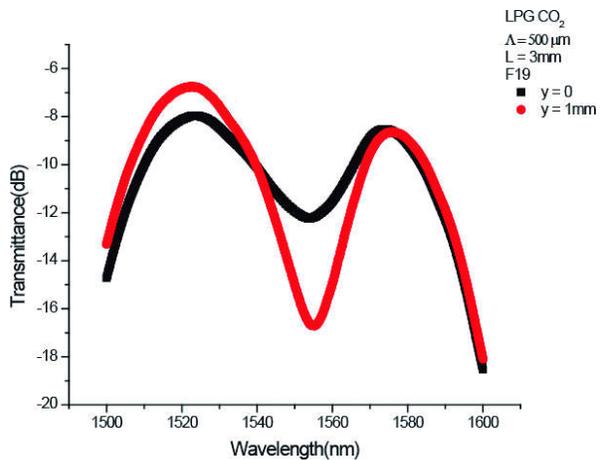


Figura 6. Se muestra la variación en el Dip de transmittancia del sensor LPG (F19) sometido a curvatura con flecha de 1mm.

3. MEDICIONES

Un cilindro de 0,305m de diámetro y 0,8m de longitud fue llenado de tierra arcilla-arenoso obtenida del suelo residual diabásico de la UNICAMP.

Se compactó una primera capa de 0,2m colocando sobre ésta superficie el primer sensor LPG (F17) de fibra óptica. La fibra fue empaquetada para prever su deterioro y contacto directo al ser enterrada en el suelo. Se añadió una capa adicional de tierra de 0,2m de espesor, volviéndose a compactar, colocándose sobre esta superficie un segundo sensor LPG (F13), repitiéndose el procedimiento cada 0,2m. La energía de compactación fue de 0,24 KNm/m³. Los sensores finalmente quedaron instalados a profundidades de 0,1m, 0,2 m, 0,4m y 0,6m, sobre el eje vertical del

cilindro, como se muestra en la figura 7. Las cargas fueron aplicadas sobre una placa circular de aluminio de 0,1m de diámetro colocada sobre la superficie del suelo.

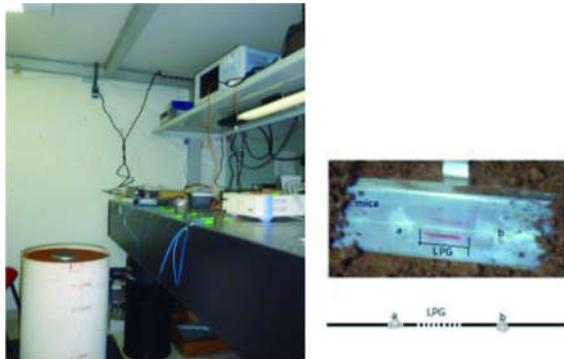


Figura 7. Se muestra el arreglo experimental usado para la determinación de esfuerzos transmitidos y deformación del suelo.

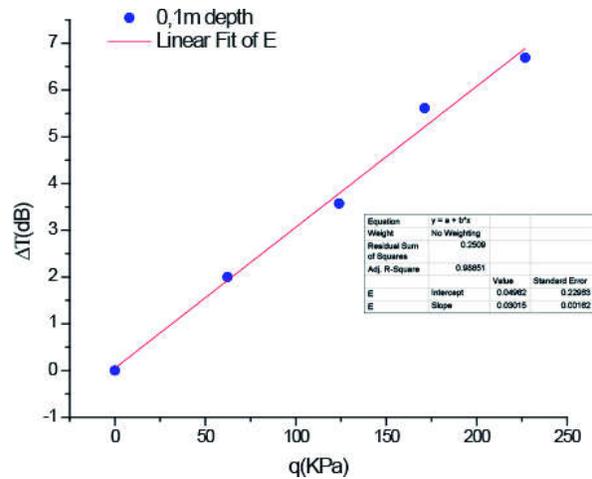


Figura 8b. Se muestra la respuesta lineal del sensor LPG (F6) sometido a cargas de hasta 226,8 KPa .

3.1. Medición de deformación del suelo

La figura 8a muestra la variación de la transmitancia del sensor de fibra óptica LPG (F6) colocado a la profundidad de 0,1m, cuando el suelo es sometido a cargas de hasta 226,8 KPa. La figura 8b muestra la linealidad de la respuesta del sensor, siendo su sensibilidad de 0,030 dB/KPa.

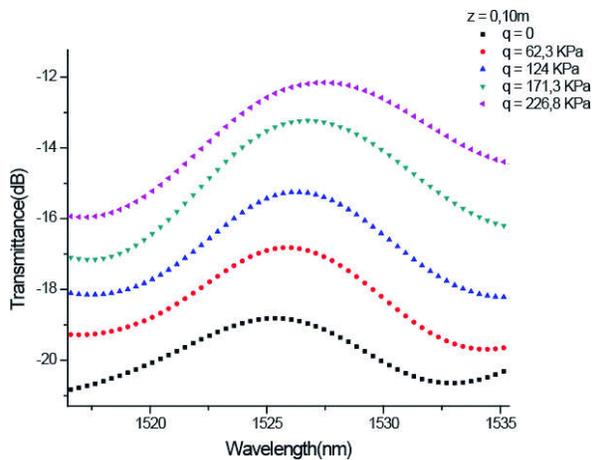


Figura 8a. La figura muestra la variación de la transmitancia en el sensor LPG (F6) colocado a 0,1m de profundidad, cuando el suelo es sometido a cargas de hasta 226,8 KPa.

La Tabla 1 muestra los valores de calibración de los sensores LPG permanentes y las correspondientes ecuaciones para determinar los valores de deformación unitaria obtenidos al aplicar las cargas σ en la superficie del suelo.

Las cargas aplicadas en la superficie del suelo fueron de 62,3 KPa; 124 KPa; 171,3KPa y 226,8KPa.

La Figura 9 muestra las curvas de ajuste de parámetros usando la ecuación 2 y los datos de deformación normalizada ξ obtenidas usando las relaciones mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Valor de Calibración de los sensores LPG

LPG	Cte1 (dB/KPa)	Cte2 (mm/KPa)	$\xi = cte2 * \sigma_s / (L-z)$
F6	0,030	0,00672	$\xi = 0.00672 * \sigma_s / 700$
F19	0,00903	0,002023	$\xi = 0.002023 * \sigma_s / 600$
F13	0,0049	0,001098	$\xi = 0.001098 * \sigma_s / 400$
F17	0,00428	0,0009587	$\xi = 0.0009587 * \sigma_s / 200$

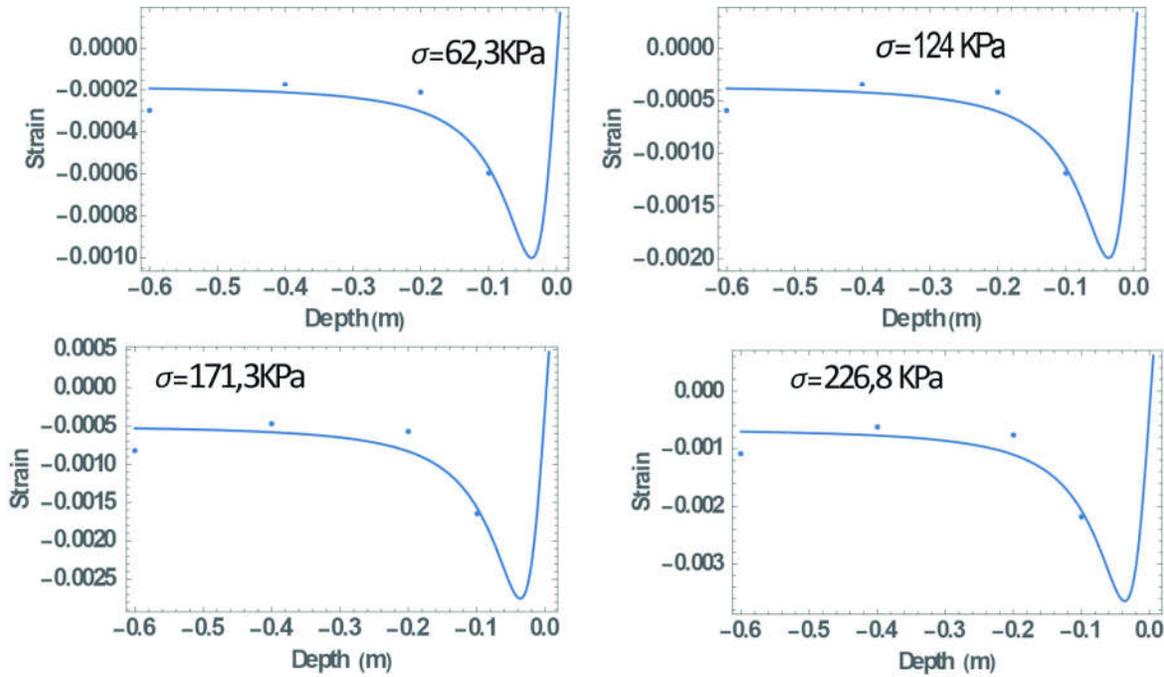


Figura 9. Los puntos en los gráficos muestran los valores de la deformación del suelo versus la profundidad, medidos por los sensores LPG, cuando este es sometido a las diferentes cargas superficiales. Las curvas de líneas continuas son las curvas de ajuste de parámetros (Y y v) usando la ecuación de Boussinesq (Ec. 2).

3.2 Transmisión de esfuerzos por el suelo

Una red mecánica de 600 μm de periodo y 20,5 mm de longitud fue enterrada a la profundidad de 0,2m para determinar el valor de la carga transmitida. La figura 10a muestra la variación de la transmitancia del sensor de fibra óptica LPG mecánico colocado a esta profundidad mientras el suelo era sometido a cargas de hasta 81,11 KPa en su superficie. La figura 10b muestra la linealidad en la respuesta del sensor.

La Figura 4b muestra la pendiente de la respuesta lineal del sensor al ser sometido a cargas en la superficie ($m_0 = 25,854 \text{ dBnm/KPa}$) y la pendiente de su respuesta lineal debido a las cargas transmitidas a 0,2m de profundidad ($m_{0,2} = 22,638 \text{ dBnm/KPa}$). El cociente de estas pendientes $m_{0,2}/m_0$ es de 0,876.

De acuerdo a la ecuación (1) de Boussinesq a esta profundidad el cociente de la carga transmitida/carga superficial esperada debe ser $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_0} = 0,87$

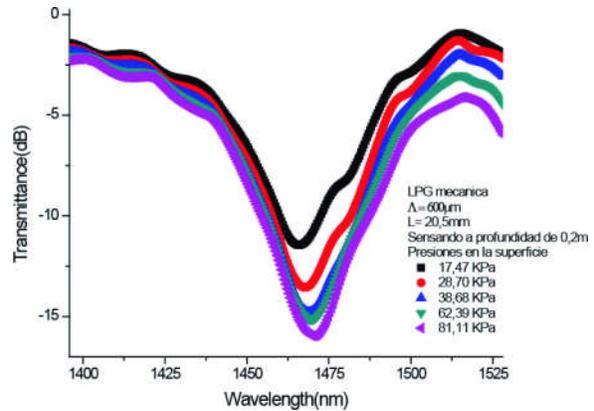


Figura 10a. Variación de la transmitancia del sensor LPG mecánico colocado a la profundidad de 0,2m mientras el suelo es sometido a cargas de hasta 81,11KPa en su superficie.

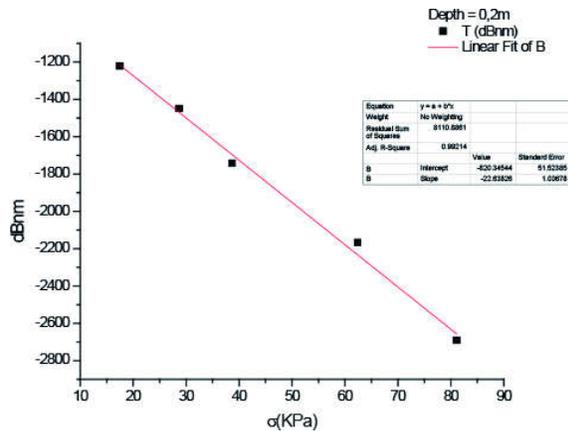


Figura 10b. La respuesta del sensor es lineal y su sensibilidad es de 22,64 dBnm/KPa.

4. Determinación de los parámetros de elasticidad del suelo

La Tabla 2 muestra los valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson determinados por las curvas de ajuste no lineal mostradas en la Figura 9.

Tabla 2. Módulos de Young y Coeficiente de Poisson

Carga en la superficie (KPa)	Módulo de Young Y (MPa)	Coficiente de Poisson ν
0,1	5,39	0,52
0,2	5,40	0,52
0,4	5,40	0,52
0,6	5,39	0,52

5. CONCLUSIONES

- Redes LPG mecánicas y LPG grabadas con láser de CO₂ fueron utilizadas para medir la curvatura del suelo ocasionada por cargas superficiales de 62,3 a 227 KPa así como la carga transmitida por el suelo a una profundidad de 0,2m.
- El valor encontrado para el modulo de Young Y = 5,40 MPa se encuentra en el rango de valores correspondiente al tipo de suelo usado (arcilla arenosa semi compactada) y medido por Paulo Rocha [6] utilizando un equipo triaxial.
- El valor encontrado para el cociente de Poisson $\nu = 0,52$ contrasta con el valor esperado para este tipo de suelo $\nu \approx 0,4$ la causa probablemente se origine del efecto de confinamiento de la muestra (cilindro metálico de $r = 0,15m$).
- Los valores de las cargas transmitidas a la profundidad de 0,2m medidas por la red LPG mecánica mostraron buen acuerdo con los valores esperados de la ecuación de Boussinesq (ec. 1).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por el soporte económico proveído para poder realizar este trabajo de investigación. Al Dr. Cristiano M. B. Cordeiro y al personal del grupo de investigación del laboratorio de fibras Ópticas de la Universidad de Campinas/Brasil por el soporte académico y técnico para desarrollar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] T. Keller, M. Berli, S. Ruiz, M. Lamande, J. Arvidsson, P. Schjønning, A.P.S. Selvadurai, Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil & Tillage Research* 140 (2014) 106–117
- [2] E. A. Novikov, V. L. Shkuratnik, R. O. Oshkin, and M. G. Zaitsev, Effect of the stress-strain state of sandy-clay soils on their thermally stimulated acoustic emission. *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, No. 2, pp. 12-17, March-April, 2017
- [3] Sunita Mishrai, Tanusree Chakraborty, Dipanjan Basu. High strain rate stress-strain response of soils- A review. *International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure. The Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering. Volume 3* (2016) Issue 2 Pages 80-85 <http://doi.org/10.3208/jgspp.v03.i13>
- [4] Hien Nghiem, Nien-Yin Chang. Soil-Structure Interaction Effects of High Rise. Buildings. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 30. (2008) http://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session_01/30.
- [5] Gerd Gudehus. *Physical Soil Mechanics*. Springer-Verlag 2011.
- [6] Paulo José Rocha de Albuquerque. *Analysis of Behavior of Small Diameter Pre-Molded Stake, Instrumentated, in Soil Residual of Diabásio of the Campinas Region*. Master's thesis in Agricultural Engineering. UNICAMP/ Brasil (1996).
- [7] M. Navarrete F. A. Godínez, M. Villagrán Muniz. Elastic Properties of Compacted Clay Soils by Laser Ultrasonics. *Int J Thermophys* Received: 9 February 2012 / Accepted: 5 January 2013 © Springer Science+Business Media New York 201. [Doi: 10.1007/s10765-013-1389-z](https://doi.org/10.1007/s10765-013-1389-z)
- [8] Américo Hossne García. Sandy loam savanna soil elastoplasticity. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, vol. 26, núm. 2, abril-junio, 2014. Cumaná, Venezuela.
- [9] Namkwon, Jaewon Song, and Jaehee Park. Mechanically Induced Long Period Fiber Grating Array Sensor. *Microwave and Optical Technology Letters / Vol. 53, No. 10, October 2011*.
- [10] Marrujo García Sigifredo et al. Temperature sensing on tapered single mode fiber using mechanically induced long period fiber gratings. *Proc. of SPIE Vol. 9577, 95770K*. © 2015 SPIE. [doi: 10.1117/12.2186505](https://doi.org/10.1117/12.2186505).
- [11] L Mosquera et al. High sensitivity LPG Mach-Zehnder sensor for real-time fuel conformity analysis. *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013).
- [12] L Mosquera, Jonas H Osório and Cristiano M B Cordeiro. Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings. *Meas. Sci. Technol.* 27 (2016) 015102 (6pp).
- [13] Yiping Wang. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser. *Journal of Applied Physics* 108, 081101- 2010.
- [14] J. S. Hallett, M. Partridge, S.W. James, D. Tiwari, T. Farewell, S. H. Hallett, and R. P. Tatam. Soil Moisture Content Measurement Using Optical Fiber Long Period Gratings. *25th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE Vol. 10323*, © 2017 SPIE. [doi: 10.1117/12.2263427](https://doi.org/10.1117/12.2263427).