

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA DE PILOTES SOMETIDOS A CARGA VERTICAL AXIAL EN ARENAS

SIMPLIFIED METHOD TO ESTIMATE THE ULTIMATE LOAD OF PILES UNDER VERTICAL AXIAL LOAD ON SAND

EDGAR GIOVANNY DIAZ-SEGURA

Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Profesor Carrera de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, edgar.diaz@ucv.cl

Recibido para revisar Junio 22 de 2012, aceptado Abril 3 de 2013, versión final Abril 9 de 2013

RESUMEN: La respuesta de diferentes pilotes sometidos a carga vertical axial fue estudiada empleando una serie de análisis mediante elementos finitos, considerando como suelo de fundación diez tipos de arenas en condición seca y saturada. A partir de los resultados obtenidos, se propone un método simplificado para estimar la carga última en pilotes preexcavados sobre arenas, en términos del diámetro y enterramiento del pilote, peso unitario del suelo, condiciones de saturación, y mediciones indirectas de la resistencia al corte del suelo, obtenidas a partir de la densidad relativa y el índice de penetración SPT. El método propuesto, basado en 180 casos analizados, ofrece una precisión de 92%, y constituye una herramienta complementaria de diseño para estimar la carga última de pilotes preexcavados en arenas.

PALABRAS CLAVE: Carga última, suelos granulares, arenas, pilotes preexcavados, modelo de elementos finitos.

ABSTRACT: A series of finite element analysis were carried out to study the response of piles under axial vertical load supported on ten types of sands in dry and saturated conditions. From these results, a simplified method was proposed to estimate the ultimate load in bored piles on sand in terms of diameter and length of pile, unit weight of soil, saturated conditions, and indirect measurements of the shear strength derived from the relative density and N-value from SPT. The proposed method, based on 180 cases analyzed, provides a precision of 92%, and constitutes a complementary simplified design tool to estimate the ultimate load of bored piles on sand.

KEYWORDS: Ultimate load, granular soils, sand, bored piles, finite element model.

1. INTRODUCCIÓN

Las fundaciones superficiales representan la forma más simple y económica de transmitir la carga de una estructura al terreno. Sin embargo, en suelos granulares de baja compacidad superficial, el uso de fundaciones profundas constituye una de las principales alternativas para transmitir las cargas hacia un estrato con mejores parámetros de resistencia y deformación.

Generalmente las fundaciones profundas están compuestas de grupos de pilotes. No obstante, su carga última es estimada, de forma regular, en función de la resistencia individual de un pilote.

El comportamiento de pilotes individuales sometidos a carga vertical en suelos granulares ha sido estudiado ampliamente, generando así el desarrollo de diferentes métodos para estimar la carga última [1-5].

La resistencia de un pilote sometido a carga vertical axial se produce por transferencia de carga mediante su punta y su manto lateral o fuste. Así la carga última, $Q_{últ}$, se define como:

$$Q_{últ} = q_p \cdot A_p + \sum q_f \cdot A_f \quad (1)$$

donde q_p = resistencia unitaria por la punta; A_p = área efectiva de la punta en contacto con el suelo; q_f = resistencia unitaria por fuste; y A_f = área lateral de contacto pilote-suelo.

Actualmente no hay consenso acerca de los métodos más adecuados para estimar la carga última, debido en gran medida al complejo comportamiento observado experimentalmente en pilotes en arenas, y a las amplias diferencias que presentan los métodos de cálculo entre sí. Por lo tanto, la modelación numérica se ha convertido en una herramienta complementaria de diseño de uso regular.

En el presente estudio, la respuesta de diferentes pilotes sometidos a una carga vertical fue estudiada mediante una serie de análisis en elementos finitos usando el software comercial PLAXIS 2D-2011 [6]. Diez tipos de arenas en condición seca y saturada fueron consideradas como suelo de fundación. El comportamiento del suelo fue modelado usando una ley constitutiva elastoplástica perfecta, con criterio de rotura Mohr-Coulomb y regla de flujo plástico no asociada.

Con base en los resultados obtenidos mediante la modelación numérica, se propone un método simplificado para estimar la carga última de pilotes en arena sometidos a carga vertical axial, en términos de mediciones de ensayos habitualmente realizados en arenas, como son la densidad relativa y el ensayo de penetración estándar SPT. Este último ampliamente usado en la práctica para la estimación de las propiedades de resistencia y deformación del suelo, debido a la dificultad para extraer muestras no alteradas en arenas.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

La modelación numérica permite considerar las principales variables que afectan el comportamiento de un pilote, como son el grado de compacidad de la arena, el diámetro y largo del pilote, las condiciones de saturación, entre otras.

Una serie de pilotes de hormigón preexcavados con sección circular, fueron modelados variando su diámetro, B , y largo, D . De esta forma, se emplearon pilotes con largos de 7.5, 10, y 15 m, y diámetros de 0.6, 0.8 y 1.0 m.

Para el modelo de elementos finitos fue usada una malla axisimétrica compuesta por elementos triangulares de 6-nodos. Un esquema de la malla tipo usada se presenta en la Figura 1. Con base en un análisis de sensibilidad de mallas, las condiciones de borde se impusieron a una distancia de 10 veces el diámetro del pilote, tanto en dirección horizontal como en vertical, esta última medida desde la punta del pilote.

La precisión numérica de un modelo de elementos finitos depende, entre otros factores, del grado de refinamiento de la malla [7]. Por lo tanto, se usó un refinamiento mayor en inmediaciones del pilote, en

especial bajo la punta, ya que usar una malla muy gruesa en esta zona condiciona ampliamente los resultados. Lo anterior a su vez contribuye a reproducir en forma más precisa las heterogeneidades inducidas durante el proceso de carga.

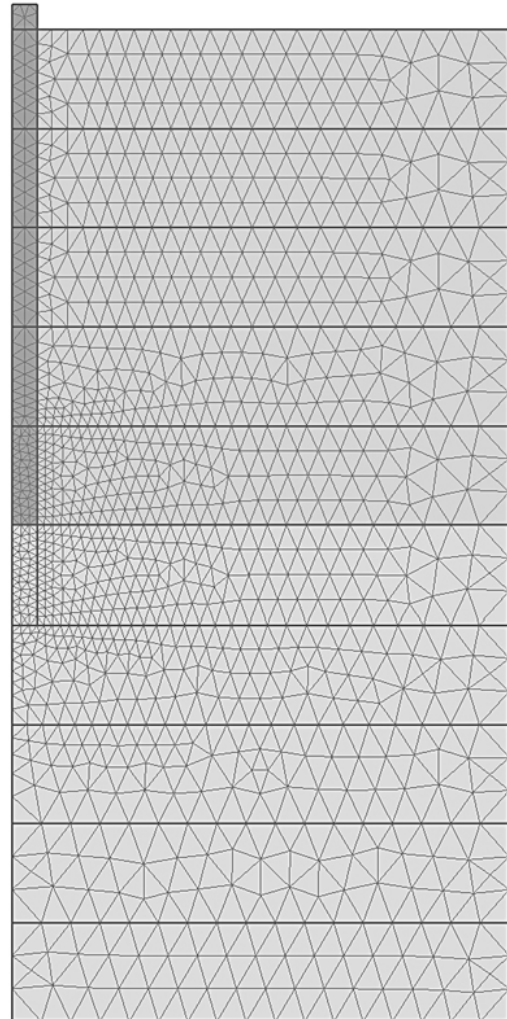


Figura 1. Esquema general de la malla axisimétrica de elementos finitos usada

Los pilotes fueron modelados considerando un comportamiento elástico, cuyas propiedades fueron: $E = 2.95 \times 10^7$ kN/m²; $\nu = 0.3$; y $\gamma = 24$ kN/m³. Además se comprobó que con los parámetros usados no se produjeran deformaciones por acortamiento del pilote. Para pilotes preexcavados, construidos con técnicas adecuadas, se recomienda emplear un ángulo de fricción de la interfaz suelo-pilote, igual al ángulo de fricción del suelo [8-9].

Predecir el comportamiento tensión-deformación del suelo es un problema complejo debido, entre otros aspectos, a su naturaleza heterogénea y no lineal. Lo anterior ha llevado a generar modelos constitutivos que requieren de un amplio número de parámetros para caracterizar el suelo. Con el fin de balancear la simplicidad del modelo y la precisión, la respuesta del suelo fue modelada usando un modelo constitutivo elastoplástico perfecto, con criterio de rotura Mohr-Coulomb, y regla de flujo plástico no asociada, es decir, ángulo de dilatación menor que el ángulo de fricción [10].

Con el fin de considerar el aumento de la rigidez que experimentan las arenas en profundidad, el módulo de Young, E , fue considerado variable en términos del esfuerzo principal menor. Para ello, el dominio fue subdividido en estratos, a los cuales se les asignó un módulo de Young obtenido mediante la expresión propuesta por Janbu [11] y modificada por Brinkgreve et al. [6]:

$$E = E^{ref} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{0.5} \quad (2)$$

siendo E = módulo de Young; E^{ref} = módulo de Young correspondiente a una presión de referencia, p_a ; σ_3 = esfuerzo principal menor; y p_a = presión atmosférica.

El dominio fue subdividido en estratos de espesor $D/5$.

Mediante análisis de sensibilidad se ha observado que dicha subdivisión genera una cantidad apropiada de estratos [12]. Lo anterior debido principalmente a que en la zona de influencia de la punta, los parámetros del suelo no varían significativamente, por lo que incluso para una subdivisión mayor de estratos la respuesta del pilote no se ve afectada.

Para el suelo de fundación bajo la punta del pilote, se consideraron diez tipos de arenas en condición seca y saturada, cuyas propiedades, obtenidas experimentalmente, están documentadas en la literatura [13-20]. Las propiedades índice, y los parámetros del modelo Mohr-Coulomb de todas las arenas empleadas se resumen en la Tabla 1.

Dado que regularmente los pilotes son usados en arenas con baja compacidad superficial, se usó de forma conservadora para todos los casos, para el suelo comprendido entre la superficie del terreno y la punta del pilote, una arena cuyo aporte en la resistencia por el fuste no fuera significativo, lo cual fue corroborado en los diferentes modelos. Para ello fue usada una arena con densidad relativa y ángulo de fricción bajo (Arena Ottawa [13], cuyos parámetros se indican en la Tabla 1).

Para las arenas que no tenían reportado la relación de Poisson, ν , se asumió igual a 0.2, cuyo valor es propio de suelos granulares [14].

Tabla 1. Propiedades de las arenas usadas

Arena	D_R (%)	D_{50} (mm)	γ_d ($\frac{kN}{m^3}$)	γ_{sat} ($\frac{kN}{m^3}$)	E^{ref} (MPa)	ν	ϕ (°)	ψ (°)
Ottawa [13]	30	0.09	14.15	18.62	9.30	0.27	31.0	1.00
Texas [15]	55	0.30	14.80	19.05	16.53	0.20	36.4	6.00
Eastern Scheldt [16]	73	0.17	15.85	19.68	33.30	0.20	40.0	12.70
	35	0.34	14.00	18.62	18.38	0.25	39.1	7.24
Maipo [17]	55	0.34	14.70	19.07	29.48	0.25	43.3	13.25
	75	0.34	15.50	19.57	33.23	0.25	47.1	19.46
Sacramento River [18]	38	0.21	14.30	18.61	19.10	0.22	35.9	5.00
Nevada [19]	35	0.16	15.40	19.46	9.74	0.23	32.4	1.33
Toyoura [20]	38	0.26	14.40	19.01	22.2	0.20	34.0	4.00
	64	0.17	15.27	19.51	30.0	0.20	39.4	9.0

En los casos de pilotes sobre arena saturada, se usó el peso unitario sumergido, γ' , en lugar del peso unitario seco, γ_d , considerando que la carga se aplica bajo condiciones drenadas. Para el estado inicial de tensiones geostático, fue definido un coeficiente de presión de tierras en reposo, K_0 , calculado de acuerdo a la teoría de la elasticidad, en términos de la relación de Poisson, ν .

3. MÉTODO SIMPLIFICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA DE UN PILOTE

A partir de los resultados obtenidos en las modelaciones realizadas, se estimaron las cargas últimas para los diferentes casos analizados. La carga última fue obtenida mediante las curvas carga-asentamiento usando el método de Brinch-Hansen [21].

La evidencia experimental ha mostrado que la respuesta de un pilote depende de parámetros relacionados tanto con el comportamiento tensión-deformación del suelo, como con las características del pilote. Por lo tanto, en aras de simplificar este complejo problema, la carga última, Q_{ult} , fue expresada como una función de un único factor, F_Q , el cual depende tanto de las propiedades del suelo como de las características del pilote.

Mediante un proceso de ajuste inicial, basado en las cargas últimas obtenidas de 90 casos (nueve tipos de pilotes apoyados sobre diez arenas secas), se obtuvo con un coeficiente de correlación $R^2=0.82$, un factor F_{Qi} expresado como:

$$F_{Qi} = \left(\frac{1.0}{D_R \cdot D \cdot B} \right) \quad (3)$$

donde D_R = densidad relativa, expresada en forma decimal; D y B = largo y diámetro del pilote en metros, respectivamente.

Para los casos modelados en las arenas saturadas, los resultados muestran una reducción en la carga última respecto a la obtenida en arenas secas. Esta reducción no varió de forma significativa en los diferentes casos evaluados. Por lo tanto, con el fin de considerar el efecto de la saturación, se incorporó un factor f_s , el cual toma valores de 1.0 para arenas secas; y de 3.5 para arenas saturadas. Adicionalmente, fue considerado el efecto del peso unitario de la arena.

Realizando un nuevo proceso de ajuste, considerando las cargas últimas obtenidas en 180 casos (nueve tipos de pilotes apoyados sobre diez arenas secas y saturadas), se propone el factor F_Q definido como:

$$F_Q = \left(\frac{f_s}{D_R \cdot D \cdot B} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} \right)^2 \quad (4)$$

donde γ = peso unitario de la arena (o peso unitario sumergido en arenas saturadas); γ_w = peso unitario del agua; y f_s = parámetro adimensional relacionado con la saturación. Los resultados obtenidos en el proceso de ajuste, cuyo coeficiente de correlación R^2 fue de 0.92, se muestran en la Figura 2.

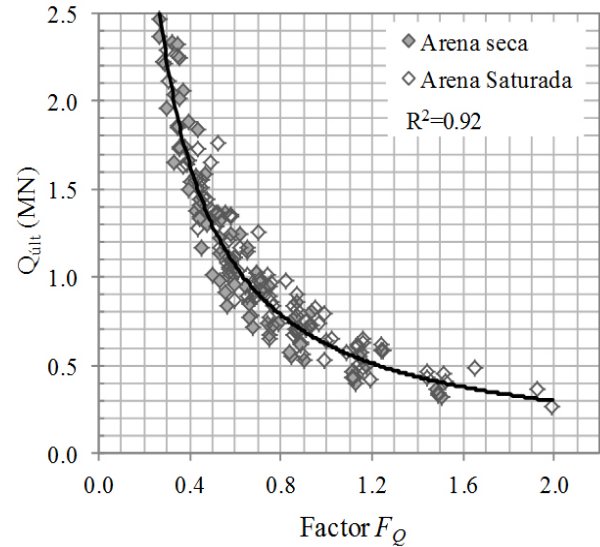


Figura 2. Carga última, Q_{ult} , en función del factor F_Q

El método propuesto puede ser usado para estimar la carga última, del lado de la seguridad, de pilotes sobre depósitos de arena húmeda, ya que en los modelos no fue incluida ninguna posible cohesión aparente que pudiera presentarse en arenas en condición de saturación parcial. No obstante se ha estimado que la cohesión aparente no influye de forma significativa en los valores de carga última de pilotes preexcavados [12].

4. ESTIMACIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA EN TÉRMINOS DEL ENSAYO SPT

Como se mencionó previamente, dada la dificultad para obtener muestras no alteradas en arenas, el SPT es uno de los ensayos in-situ más usados en la ingeniería práctica para caracterizar este tipo de suelos. Aunque el SPT no mide directamente la resistencia al corte de la arena, a partir de sus resultados se han obtenido muy buenas correlaciones con la densidad relativa, ángulo de fricción interna, entre otros parámetros [22-23]. Con el fin de estimar la carga última en términos del SPT, siguiendo el método propuesto, se usó la expresión formulada por Kulhawy y Mayne [22], que cuenta con una amplia base experimental, la cual para arenas normalmente consolidadas, secas o saturadas [24], queda definida como:

$$D_R = \left[\frac{(N_1)_{60}}{C_A C_P} \right]^{0.5} \quad (5)$$

donde $(N_1)_{60}$ = índice de penetración normalizado; $C_A = 1.2 + 0.05 \log(t/100)$; t = edad del depósito de suelo, en años; $C_p = 60 + 25 \log(D_{50})$; y D_{50} = diámetro medio de partículas expresado en milímetros.

Se ha comprobado que el valor del índice de penetración, N , depende en forma significativa de aspectos asociados al procedimiento mismo del ensayo [25]. En consecuencia, a fin de poder hacer una interpretación adecuada y unificada del ensayo, se han propuesto factores correctores que buscan incorporar la influencia de las diferentes variables que afectan las mediciones. Así, $(N_1)_{60}$ queda definido como:

$$(N_1)_{60} = N_{medido} C_N C_E C_B C_S \quad (6)$$

siendo N_{medido} = índice de penetración medido; C_N = factor de corrección por confinamiento [26-27]; C_E = factor corrector por energía [25]; C_B = corrección de acuerdo al diámetro del sondaje [25]; C_S = corrección cuando no se usa tubo muestreador interior (“liner”) [25]. El factor corrector por concepto de longitud de barras, C_R , fue definido igual a 1.0, de acuerdo con lo establecido en [28-29].

A partir de las Ecuaciones (4) y (5), se propone el factor F_{QN} usado para la estimación de la carga última del pilote en términos de los resultados del ensayo SPT:

$$F_{QN} = \left[\frac{C_p}{(\bar{N}_1)_{60}} \right]^{0.5} \left(\frac{f_s}{D \cdot B} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} \right)^2 \quad (7)$$

donde $(\bar{N}_1)_{60}$ corresponde al valor promedio del índice de penetración normalizado, calculado entre una profundidad de D a $D+2B$, siguiendo la recomendación indicada por O’Neil y Reese para pilotes preexcavados [4].

Con base en los resultados de los modelos de elementos finitos indicados en la Figura 2, y considerando el factor F_{QN} , se propone la Figura 3 para la estimación de la carga última de un pilote en términos de mediciones del ensayo SPT. Dado que el factor C_A en (5) no es muy sensible al valor de tiempo elegido, desde el punto de vista práctico se adoptó un valor de $t = 1000$ años [30], es decir, se consideró $C_A = 1.25$.

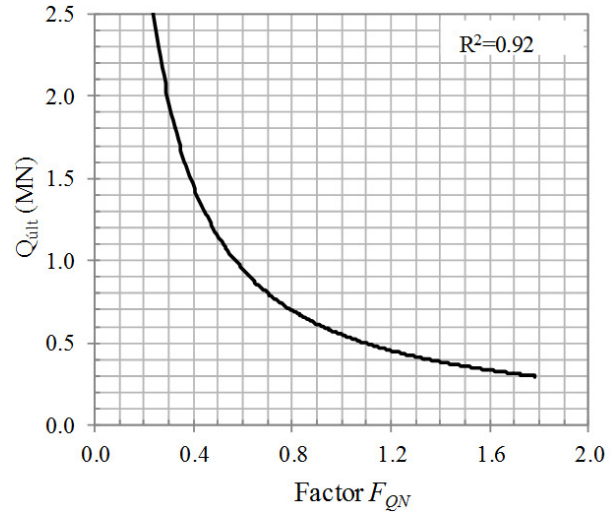


Figura 3. Carga última, Q_{ult} , en función del factor F_{QN}

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de diferentes modelaciones en elementos finitos, se propone un método simplificado para estimar la carga última de pilotes preexcavados en arenas sometidos a una carga axial vertical estática. El método permite incorporar el efecto del diámetro y profundidad del pilote, el peso unitario del suelo, las condiciones de saturación y mediciones indirectas de la resistencia al corte del suelo derivadas de la densidad relativa y del ensayo SPT.

Los factores propuestos, F_Q y F_{QN} , ofrecen un buen ajuste para la estimación de la carga última, obteniéndose un coeficiente de correlación de 92%, considerando los 180 pilotes analizados.

Para pilotes en arenas saturadas, se observó una reducción en la carga última respecto a la obtenida en arenas secas. No obstante, esta reducción no varió de forma significativa en los diferentes casos analizados. De esta forma, se obtuvo que la carga última en arenas saturadas es en promedio 70% de la carga última obtenida en arenas secas.

Se recomienda para la modelación numérica realizar un adecuado refinamiento de la malla en cercanías al pilote, en especial bajo la punta, ya que esto condiciona ampliamente los resultados. De ser posible, es aconsejable realizar siempre un análisis de sensibilidad de mallas para cada problema, lo cual permite de forma

directa evaluar la influencia, de tipo numérico, que el mallado ofrece al problema en análisis.

El método propuesto constituye una herramienta de aplicación rápida para estimar la carga última de pilotes preexcavados en arenas. Cabe mencionar que dada la amplia variabilidad que se puede presentar en las condiciones del terreno de fundación, y que adicionalmente la mayoría de los métodos de cálculo para estimar la carga última fueron propuestos para condiciones o arreglos muy específicos, es recomendable realizar una estimación con un alto criterio ingenieril y preferiblemente usando varios procedimientos de cálculo.

REFERENCIAS

- [1] Vesic, A. S., A Study of bearing capacity of deep foundations. Final report, Project B-189. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 1967.
- [2] Meyerhof, G. G., Bearing capacity and settlement of pile foundations, *J. Geotech. Eng. Div.*, 92(3), pp. 195-228, 1976.
- [3] NAVFAC DM-7.2. Foundations and earth structures. Alexandria, VA, USA. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, 1986.
- [4] O'Neill, M. W. and Reese, L. C., Drilled shafts: Construction procedures and design methods. FHWA-IF-99-025. Washington, DC, USA. Federal Highway Administration, 1999.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers. Design of pile foundations. EM 1110-2-2906. Washington, DC, USA. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, 1991.
- [6] Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M. and Engin, E., PLAXIS 2D Reference manual. Delft University of Technology and PLAXIS b.v. The Netherlands, 2011.
- [7] Ibañez, L., Pruebas de carga no destructivas en pilotes, *Dyna*, 75(155), pp. 57-61, 2008.
- [8] Petek, K., Felice, C. W. and Holtz, R. D., Capacity analysis of drilled shaft with defects. International Deep Foundations Congress, ASCE. Orlando, Florida, pp. 1120-1135, 2002.
- [9] Rollins, K. M., Clayton, R. J., Mikesell, R. C. and Blaise, B. C., Drilled shaft side friction in gravelly soils, *J. Geotech. and Geoenv. Engrg.*, 131(8), pp. 987-1003, 2005.
- [10] Chen, W. F. and Mizuno, E., Nonlinear analysis in soil mechanics: Theory and implementation, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 1990.
- [11] Janbu, N., Soil compressibility as determined by edometer and triaxial test. Proc. Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Wiesbaden, Germany, pp. 10-25, 1963.
- [12] Atucha, I. y Prierer, M., Revisión y análisis de métodos para el cálculo de la capacidad de soporte de pilotes individuales preexcavados en arena, sometidos a carga axial. Tesis de Grado, Valparaíso, Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2009.
- [13] Dakoulas, P. and Sun, Y., Fine Ottawa sand: experimental behavior and theoretical predictions, *J. Geotech. Engrg.*, 118(12), pp. 1906-1923, 1992.
- [14] Lade, P. and Nelson, R., Modelling the elastic behavior of granular materials, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 11(5), pp. 521-542, 1987.
- [15] Briaud, J. L. and Gibbens, R. M., Large scale load tests and data base of spread footings on sand. Publication N° RD-97-068. Federal Highway Administration, Washington, D.C. USA, 1997.
- [16] Jacobsen, K. P., Praastrup, U. and Ibsen, L., The influence of stress path on the characteristic stress state. Proceedings 2nd Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomechanics. Torino, Italy, pp. 659-666, 1999.
- [17] Rodríguez-Roa, F., Observed and predicted behavior of Maipo River sand, *Soil and Foundations*, 43(5), pp. 1-11, 2003.
- [18] Lee, K. L. and Seed, H. B., Drained strength characteristics of sands, *J. Soil Mech. Found. Engine. Div.*, 93(6), pp. 117-141, 1967.
- [19] Yamamuro, J. A. and Lade, P. V., The behavior and modeling of silty sands susceptible to static liquefaction, *Mechanics of cohesive-frictional materials*, 4(6), pp. 545-564, 1999.
- [20] Verdugo, R. and Ishihara, K., The steady state of sandy soils, *Soil and Foundations*, 36(2), pp. 81-91, 1996.
- [21] Brinch-Hansen, J., Discussion: Hyperbolic stress-strain response. Cohesive soils, *J. Soil Mech. Found Div.*, 89(SM4), 241-242, 1963.

- [22] Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W., Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800. Palo Alto, CA, USA. Electric Power Research Institute, 1990.
- [23] Diaz, E. G. and Rodríguez-Roa, F., Design load of rigid footings on sand, *Can. Geotech. J.*, 47(8), pp. 872-884.
- [24] Mayne, P. W., Comunicación personal via e-mail, 2008.
- [25] Skempton, A. W., Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation, *Geotechnique*, 36(3), pp. 425-447, 1986.
- [26] Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., ET AL. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of the liquefaction resistance of soils, *J. Geotech. and Geoenv. Engrg.*, 127(10), pp. 817-833, 2001.
- [27] Liao, S. C. and Whitman, R. V., Overburden correction factors for SPT in sand, *J. Geotech. Eng. Div.*, 112(3), pp. 373-377, 1986.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers. ASTM, D4633-05, USA, 2005.
- [29] Daniel, C. R., Howie, J. A., Jackson, R. S. and Walker, B., Review of standard penetration test short rod corrections, *J. Geotech. and Geoenv. Engrg.*, 131(4), pp. 489-497, 2005.
- [30] Coduto, D. P., *Foundation Design, Principles and Practices*, 2nd Ed., Prentice-Hall Inc, NJ, USA, 2001.