

Comparación de los ensayos de penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA® ensayo de placa de carga estática y dinámica

Sebastián LÓPEZ^{a,1} y Miguel BENZ^b

^a*Ecole des Ponts ParisTech, Paris, Francia y Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile*

^b*Sol-Solution, Riom, Francia.*

Resumen. El control de infraestructuras viales requiere evaluar la calidad de ejecución (materiales, espesor de capas, compactación...) de las obras con el fin de asegurar la capacidad portante proyectada. El ensayo de placa de carga (ASTM D 1194) es uno de los más empleados para evaluar la capacidad portante. El ensayo consiste en la aplicación de una serie de cargas al suelo mediante una placa circular, obteniendo así el diagrama esfuerzo deformación desde donde se determinan los módulos de reacción (E_{v1} y E_{v2}). A pesar de su uso masivo, es un ensayo que requiere de recursos no siempre disponibles y tiempos prolongados para su ejecución. Por otra parte, estos últimos 20 años hemos asistido al desarrollo creciente del ensayo de carga dinámica ligera (ASTM E2835). Este permite la obtención del módulo dinámico (E_{vd}) y de reacción (E_{v2}) en menor tiempo y costo. Su utilización es común en Europa, así como en América del norte. Aunque la versión dinámica del ensayo de placa responde a las dificultades operacionales del ensayo tradicional, en ambos casos la determinación del grado de compactación y del espesor de capas de la obra construida es imposible. El ensayo de penetración PANDA®, ampliamente utilizado para el control de la compactación en Francia y en muchos otros países, como en Chile (NCh 3261/2012), presenta así un interés particular. Además del bajo costo, de la simplicidad del ensayo y de la rapidez de ejecución, el ensayo permite una medición fina y casi continua de la evolución de la resistencia de punta en profundidad. Esto permite fácilmente identificar los espesores de las capas compactadas. Una amplia base de datos de curvas de calibración para distintos suelos permite además evaluar el grado de compactación de cada capa. No obstante, a pesar de las ventajas y el interés importante que presenta este equipo, en la actualidad pocos trabajos han sido desarrollado con el fin de evaluar la capacidad portante (E_{v2} , E_{vd}) a partir de la resistencia de punta medida con PANDA®. En el presente trabajo se propone una síntesis bibliográfica de los trabajos existentes, así como un método de análisis y correlación entre los resultados de ensayos de placa y PANDA®, aplicable a diferentes tipologías de obras de ingeniería y condiciones de aplicación, basada en ensayos de laboratorio y terreno.

Palabras Clave. Penetrómetro PANDA 2, Placa de carga, LFDW, obras viales.

¹ Corresponding author, E-mail: slopez1@uc.cl.

1. Introducción

El control geotécnico en infraestructura vial representa una de las actividades más importantes al considerar el impacto de la estabilidad del suelo en el comportamiento general de la estructura, por esto, la aplicación de ensayos geotécnicos in situ se convierte en una necesidad para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas previstas en diseño.

En la actualidad se encuentran disponibles un gran número de equipos diseñados para el control geotécnico in situ, cada uno con características y propósitos diferentes (densímetros nucleares, cono de arena, densímetros eléctricos, penetrómetros, placas de carga, entre otros), sin embargo, uno de los más empleados en el campo de las obras viales es la placa de carga estática (ASTM D1195) [1]. El ensayo de placa de carga estática ha sido empleado por décadas en la práctica de la ingeniería, sin embargo, presenta dificultades en la aplicación en terreno considerando el requerimiento de elementos auxiliares tales como vehículos pesados para la generación de la reacción de sobrecarga, además el tiempo requerido para su ejecución puede resultar un impedimento frente a la necesidad de ejecutar un mayor número de ensayos en un mismo proyecto.

El ensayo de Placa de Carga Dinámica (LFWD), creado en Alemania en la década del 80, permite la obtención de un módulo de deformación dinámico (E_{vd}), el cual puede ser relacionado con los módulos de deformación entregados por el ensayo de placa de carga estática, sin embargo, aún no es posible reemplazar por completo el control mediante ensayo de placa estática, por lo que se recomienda el empleo de la placa dinámica como un complemento en la mejora de la calidad del control geotécnico in situ de la infraestructura vial [2].

El equipo PANDA [3], es un penetrómetro dinámico ligero de energía variable ampliamente usado en Francia y su empleo se ha extendido por Europa y algunos países de Asia y Sudamérica. En Chile se ha utilizado en investigación y además se encuentra normado para su empleo en el control de obras mineras de depósitos de relaves mediante norma NCh 3261 oficial 2012 [4-10].

Una de las principales ventajas asociadas al empleo del penetrómetro dinámico PANDA, es la posibilidad de analizar un mayor número de parámetros y variables en el suelo (espesores de capa, densidades, entre otros), viéndose potenciado con la posibilidad de registrar un perfil de resistencias versus la profundidad del registro.

El presente documento está dirigido a la presentación de relaciones existente entre estos tres ensayos geotécnicos, para permitir el empleo de forma complementaria de dichos ensayos en el control de infraestructura vial. Se presentan un conjunto de correlaciones desarrolladas y validadas por la bibliografía existente y se proponen formulaciones desarrolladas para relacionar la resistencia de punta del penetrómetro PANDA (qd_{PANDA}) y el módulo de deformación dinámico (E_{vd}). Finalmente se presenta un método preliminar de análisis y correlación $qd_{PANDA} - E_{vd}$ tomando como base un suelo arenoso grueso.

2. Penetrómetro dinámico ligero PANDA 2

El equipo PANDA 2 [3-6, 11], es un penetrómetro dinámico ligero a energía variable con la capacidad de medir la resistencia del suelo a la penetración de una punta cónica de 2, 4 y hasta 10 cm^2 . es accionado por medio del golpe de un martillo normalizado sobre un cabezal instrumentado con captadores que permiten la medición de la energía del

golpe (Figura 1). Este es montado en un conjunto de barras normalizado. Los datos arrojados en cada golpe son almacenados en un equipo de análisis y registro (TDD) que permite visualizar y analizar los resultados in situ.

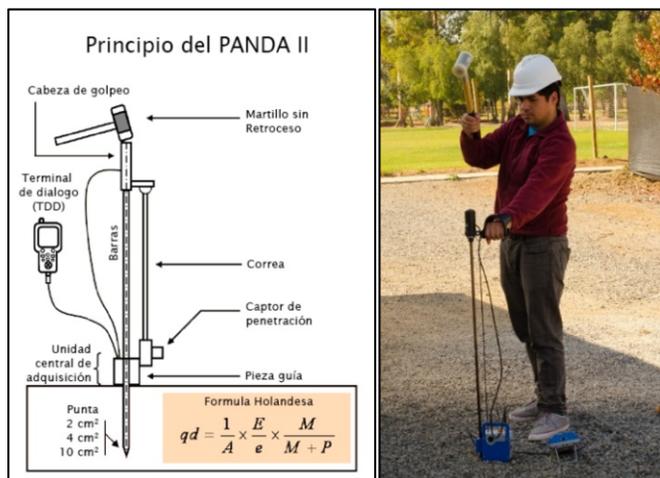


Figura 1. Principio y aplicación del equipo Panda 2.

Para cada golpe dado durante el sondeo, el equipo registra la energía requerida para la hincada de la punta y la penetración que esta experimenta en el suelo. Con estos datos es posible calcular la resistencia dinámica de punta mediante el empleo de la fórmula de los holandeses [12] (1).

$$q_d = \frac{1}{A} \cdot \frac{\frac{1}{2}MV^2}{e} \cdot \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \quad (1)$$

donde e =penetración de punta, A =sección de punta, M =masa del martillo, P =masa del conjunto hincado (penetrometro : punta, barra y cabezal) y V =velocidad de impacto.

Al ser un penetrometro de energía variable, permite la aplicación diferentes niveles de energías durante el golpeo, aumentando la versatilidad del equipo, donde para el caso de suelos blandos o duros es posible disminuir o aumentar la energía de hincada con el objetivo de aumentar la calidad y precisión en los datos obtenidos durante el sondéo.

3. Placas de carga

3.1. Placa de carga dinámica

La placa de carga dinámica [13] o “*Light Falling Weight Deflectometer*” (LFD) es un equipo portable creado en Alemania en la década del 80, diseñado para medir la capacidad de carga dinámica de suelos de forma más accesible y rápida (Figura 2), a través de la medición del módulo de deformación dinámico (E_{vd}).

El valor del módulo de deformación dinámico entregado por el equipo, está pensado en la caracterización geotécnica del suelo desde el punto de vista de la simplificación y

facilitación de la obtención de los módulos de compresibilidad de la placa de carga estática [1], evitando además la necesidad de emplear maquinaria o vehículos pesados para la generación de la sobrecarga.

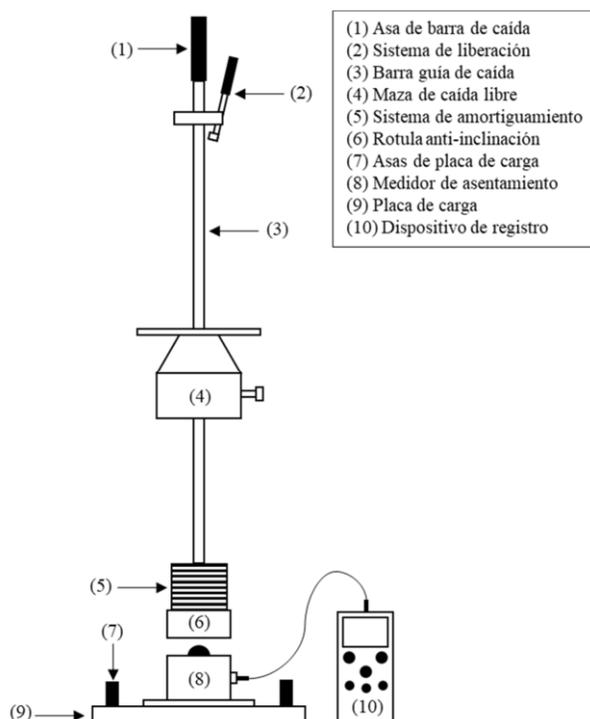


Figura 2. Placa de carga dinámica.

3.1.1. Procedimiento de ensayo LFWD

La ejecución de un ensayo de placa dinámica requiere de un operador, el cual debe ejecutar algunos procedimientos mínimos de preparación del área de trabajo y armado del equipo, donde en primera instancia se debe allanar la superficie de apoyo de la placa, considerando un área mínima de 1,5 veces el radio de la placa.

Una vez lista la superficie de apoyo, se debe ubicar la placa teniendo la precaución de que no existan oquedades o desniveles en la superficie de apoyo que impidan el contacto horizontal y completo de la placa. Con la placa apoyada, se procede a conectar el sistema de adquisición de datos y a la instalación de la barra guía con la maza de caída libre, teniendo la precaución de evitar caídas no controladas de la maza o movimientos del equipo, que puedan perturbar el suelo a ensayar. Con el equipo de ensayo preparado se configura y arranca el sistema de adquisición de datos y se posiciona y asegura la maza de caída libre en la parte superior de la barra guía por medio del sistema de liberación. Finalmente, la maza es liberada del seguro, permitiéndole caer y realizar un rebote sobre la placa reteniéndola en el retroceso. Este procedimiento de caída debe ser repetido 3 veces. Si se producen errores en la ejecución o desplazamientos horizontales en la placa, el ensayo debe ser repetido. El módulo de deformación dinámica (E_{vd}) es el valor promedio de los módulos de deformación dinámicos obtenidos por los 3 golpes de la maza deflectora.

3.2. Placa de carga estática

El ensayo de Placa de Carga Estática [14], es empleado para determinar el comportamiento carga-deformación del suelo, del cual se puede obtener los módulos de compresibilidad (E_{v1} y E_{v2}) y el módulo de reacción (E_k), dependiendo del análisis empleado y los requerimientos técnicos solicitados.

El empleo de este ensayo es amplio en el campo de la infraestructura vial, sin embargo, su aplicación presenta limitaciones producto de las características intrínsecas del procedimiento requerido, para el cual es necesario el empleo de vehículos pesados como elemento de reacción en la generación de la carga, además de los periodos de tiempo prolongados necesarios para la ejecución del ensayo.

Una de las principales ventajas de este ensayo es la gran base de datos contenida en la bibliografía disponible, la cual pone a disposición un gran número de casos de estudio previos extrapolables, de los cuales se pueden extraer valores referenciales de parámetros geotécnicos y descripciones del comportamiento geotécnico de dichos suelos.

3.2.1. Módulos de compresibilidad E_{v1} y E_{v2}

De la aplicación de carga en el ensayo pueden obtener diferentes valores de módulo de compresibilidad, los cuales dependerán del ciclo de carga aplicado. Para un primer ciclo de carga se obtiene E_{v1} y para una primera recarga E_{v2} (Figura 3). Los módulos de compresibilidad pueden ser empleados para el análisis del estado de compactación del suelo, donde valores altos de la relación E_{v2}/E_{v1} , es indicativo de una compactación insuficiente.

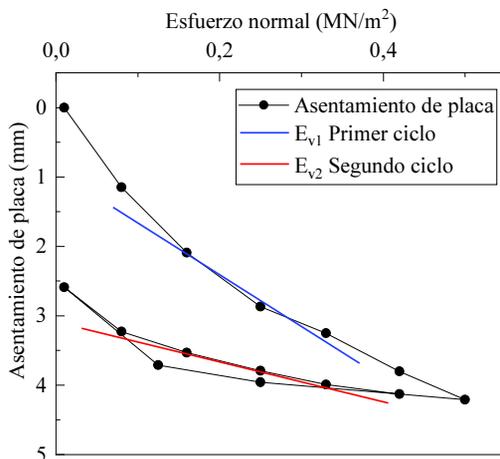


Figura 3. Interpretación de ensayo de placa de carga [15].

4. Correlaciones

El empleo de ensayos in situ de menor complejidad permite el control en un mayor número de puntos dentro de un mismo proyecto, por lo que su empleo en complemento a ensayos tradicionales como la Placa de Carga Estática [14], aumenta la efectividad del control geotécnico.

Para el empleo complementario de distintos ensayos geotécnicos es posible recurrir a formulaciones que relacionan los valores de los parámetros geotécnicos, las cuales han sido desarrolladas bajo diferentes condiciones, por lo que es necesario un análisis previo a la selección de dichas relaciones. A continuación, se presentan algunas de las formulaciones de correlación más comunes entre los ensayos de placa estática y dinámica y el penetrómetro dinámico PANDA.

4.1. Relaciones E_{vd} - E_{v1} y E_{v2}

Una de las correlaciones más importantes es la presentada en ZTVA-StB 97 [2], en el cual se indica la posibilidad de emplear la placa de carga dinámica, en casos donde se presenten lugares de difícil acceso o se requiera de mucho tiempo para la realización de ensayos de compactación y Proctor, además, debido a la rapidez del procedimiento se indica la ejecución de un mayor número de ensayos, mejorando la precisión de los resultados.

Para la aplicación de placa de carga en base a ZTVA-StB 97, se indica la necesidad de realizar una calibración previa al inicio del control geotécnico, implicando la ejecución de un conjunto de ensayos comparativos para el establecimiento de la relación entre parámetros (E_{vd} - E_{v1} y E_{v2}), sin embargo, también se permite en los casos donde no sea posible dicha calibración, el empleo de ecuaciones basadas en la experiencia. Para los casos donde no es posible realizar una calibración, el documento presenta los siguientes valores referenciales para el establecimiento de una relación.

Tabla 1. Valores de correlación E_{v1} - E_{vd} referenciales [2].

E_2 (MN/m ²)	E_{vd} (MN/m ²)
180	80
150	70
120	60
100	50
80	40
60	30
45	25
20	15

Otras correlaciones han sido publicadas, cuales han sido realizadas en base a diferentes condiciones y características de suelos. Dichas ecuaciones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Correlaciones E_{vd} - E_{v1} y E_{v2} .

Autor	Relaciones	Tipo de suelo
Alshibli et al. (2005) [16]	$E_1 = 0,907E_{vd} - 1,812$ (MPa)	Aplicación general: · Arcillas · Arcillas limosas · Caliza · Arcilla-cemento · arenas
	$E_2 = 25,25e^{0,006E_{vd}}$ (MPa)	
Nazal (2003) [17]	$E_{PLT(1)} = 22 + 0,7(E_{LFD})$	· Arcillas de baja plasticidad. · Arena pobremente graduada. · Grava pobremente graduada
	$E_{PLT(2)} = 20,9 + 0,69(E_{LFD})$	
	$(12,5 \text{ MPa} < E_{LFD} < 865 \text{ MPa})$	

Tabla 2. (continuación) Correlaciones E_{vd} - E_{v1} y E_{v2} .

Autor	Relaciones	Tipo de suelo
Zoltán (2009) [18]	$E_1=0,83E_{vd}$	· Todo tipo de suelos
	$E_2=1,61E_{vd}$	
	$E_2=1,58E_{vd}$	· Suelo granular grueso y fino
	$E_3=1,3E_{vd}$	· Suelos limosos
	$E_2=1,69E_{vd}$	· Capas de subrasante de grava chancada · Base estabilizada mecánicamente

4.2. Correlación $qd_{panda} - E_{vd}$

Arriero (2009) [19], relacionó la resistencia a la penetración promedio (qd_{panda}), ejercida sobre una punta cónica de 4 cm², y el módulo de deformación E_{vd} , realizando ensayos sobre una cancha de pruebas de 10 m por 25 m, construida mediante capas de 30cm, constituidas de suelos limosos y arenosos. En base a lo anterior Arriero [19] definió la relación entre los parámetros en la capa 3 y 6, obteniendo las siguientes relaciones.

Tabla 3. Relación entre los parámetros en la capa 3 y 6.

Capa	Relación
3	$E_{vd}=16,48(qd_{PANDA}) - 7,1824$
6	$E_{vd}=25,9(qd_{PANDA}) - 20,95$

5. Campaña experimental

Para obtención de los valores de resistencias de punta (qd_{pANDA}) y módulo de deformación dinámico (E_{vd}), se han construido una serie de 5 probetas a diferentes niveles de densidad en moldes normalizados [3], empleando un suelo arenoso grueso y se ha fijado la humedad en un 8%. Los ensayos fueron realizados bajo presión atmosférica y permiten además realizar la calibración para el equipo PANDA [3], obteniendo la relación densidad-resistencia de punta, que puede ser empleada en la obtención y análisis de otros parámetros geotécnicos. Los ensayos de placa dinámica fueron ejecutados a una altura de 45cm (mitad de altura de espécimen) y en el coronamiento a una altura aproximada de 100cm. Posteriormente se realizaron los ensayos de penetración dinámica PANDA, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4. Resultados de ensayos de placa de carga dinámica y penetración PANDA sobre especímenes.

Moule	Zc (m)	qdo (Mpa)	qd1 (Mpa)	dens s (kN/m3)	W (%)	Dens t (kN/m3)	Evd (Mpa)
1	0,10	0,13	0,57	13,12	8	14,28	3,47
2	0,25	1,13	1,46	14,67	8	15,87	6,27
3	0,35	1,88	1,93	15,64	8	16,95	13,91
4	0,45	1,94	2,39	15,99	7	17,26	12,92
5	0,20	0,66	0,85	14,21	8	15,38	5,68

El establecimiento de la relación entre los valores de qd_{pANDA} y E_{vd} puede realizarse de forma directa (Figura 4). Sin embargo, debe tener precaución de considerar las

condiciones de terreno (humedad, densidad óptima, espesores de capa, etc.), para el establecimiento de nuevas correlaciones.

Establecida la relación es posible calcular la resistencia de punta promedio en el estrato que se requiere analizar o aplicar la relación a las mediciones del penetrograma punto a punto (Figura 5), permitiendo obtener un perfil de módulos dinámicos E_{vd} que puede ser empleado en el control in situ.

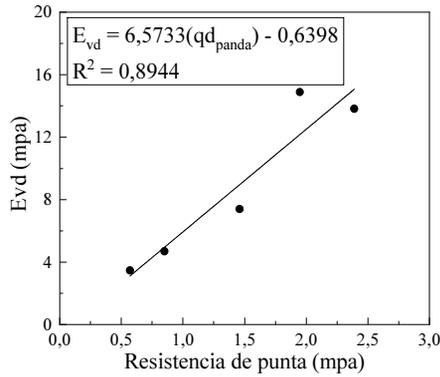


Figura 4. (a) Relación $qd_{PANDA} - E_{vd}$, (b) Relación γ_S y E_{vd} .

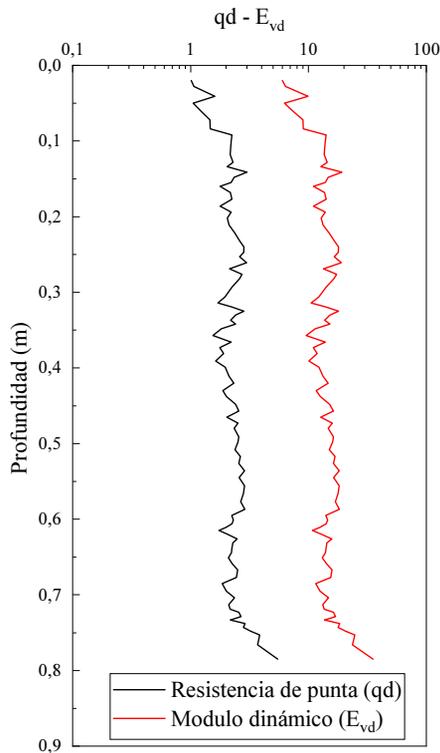


Figura 5. Perfil penetrométrico $qd_{PANDA} - E_{vd}$.

6. Conclusiones

El penetrómetro dinámico PANDA y la placa de carga dinámica, presentan ventajas comparativas respecto del método de ejecución del ensayo, sin embargo, su uso debe responder aun a los requerimientos técnicos asociados a otros ensayos como lo es la placa de carga estática.

Si bien el desarrollo de correlaciones entre los módulos de deformación dinámicos (E_{vd}) y resistencia a la penetración dinámica (qd_{PANDA}) no es extendido, las relaciones establecidas por medio calibración demuestran una relación que se ajusta linealmente en suelos limosos y arenosos finos y gruesos, sin embargo, es necesario el desarrollo de nuevas relaciones bajo diferentes condiciones para establecer correlaciones específicas y aumentar el grado de precisión en el análisis in situ.

Se debe avanzar hacia la creación y ajuste de las relaciones entre los distintos equipos pues esto permitiría la ejecución de un control geotécnico más preciso y exhaustivo, donde la complementariedad pueda ser aplicada, especialmente en proyecto que pueden ser altamente sensible como lo son las obras viales.

El método de establecimiento de la relación $E_{vd} - qd_{PANDA}$ permite la generación de ecuaciones para el análisis del módulo dinámico (E_{vd}), sin embargo, se requiere de un mayor número de ensayos para el establecimiento de correlaciones más precisas.

Si bien la Placa de Carga Dinámica y el penetrómetro PANDA pueden ser empleados en el control de infraestructura vial de forma individual o en conjunto con la Placa Estática, el penetrómetro PANDA presenta ventajas asociadas a la versatilidad y posibilidades de control punto a punto por medio del penetrograma.

References

- [1] ASTM, *Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of*, vol. 93, no. Reapproved. United States, 2015, pp. 5–7.
- [2] FGSV, ZTVA-StB 97 - *Pliego de Condiciones Técnicas y recomendaciones para obras de tierra en la construcción de carreteras*. Alemania, 1997.
- [3] AFNOR, XP P 94-105 *Suelos : Reconocimiento y pruebas Control de calidad de compactación Norma experimental Correspondencia Ejecución de excavaciones BNSR-CTT*. Francia, 2000, pp. 1–33.
- [4] R. Espinace A et al., “pénétromètre Panda ®Stability of chilean’s tailings dams with the Panda® penetrometer. Experiences of the last 10th,” in *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, pp. 519–522.
- [5] R. Espinace et al., “Nueva Alternativa para el Control de Compactación de Tranques de Relave. El Penetrómetro PANDA,” *Rev. la Construcción*, vol. 6, no. 2, pp. 33–41, 2007.
- [6] C. Sanhueza and G. Villavicencio, “Estimación de parámetros resistentes a partir del ensayo de penetración PANDA y su aplicación en el cálculo de la capacidad de soporte y asentamientos del suelo de fundación (1a parte),” *Rev. la Constr.*, vol. 9, no. 1, pp. 120–131, 2010.
- [7] G. Villavicencio, P. Breul, R. Espinace, and P. Valenzuela, “Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural,” *Rev. la Constr.*, vol. 11, no. 1, pp. 119–133, 2012.
- [8] G. Villavicencio A, P. Breul, C. Bacconnet, A. Fourie, and R. Espinace A, “Liquefaction potential of sand tailings dams evaluated using a probabilistic interpretation of estimated in- situ relative density,” *Rev. La Constr.*, vol. 15, no. 2, pp. 9–18, 2016.
- [9] R. Espinace, G. Villavicencio, and L. Lemus, “The PANDA technology applied to design and operation of tailings dams,” in *Tailings 2013. First International Seminar on Tailings Management*, 2013, no. August 2013.
- [10] C. Sanhueza and G. Villavicencio, “Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca,” *Rev. la Constr.*, vol. 11, no. 1, pp. 16–31, 2012.

- [11] INN, NCh3261-2012 - *Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero*. Chile, 2012.
- [12] B. Frazer, "Formulas de hinca dinámica," *Rev. Obras Pública*, pp. 977–990, 1971.
- [13] ASTM, *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*. 2015.
- [14] ASTM, D 1194 –94 *Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings*. 1994, pp. 1–3.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung, *Soil - Testing procedures and testing equipment - Plate load test*. Alemania, 2001.
- [16] K. A. Alshibli, M. Abu-Farsakh, and E. Seyman, "Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 560–569, 2005.
- [17] M. D. Nazzal, "Field evaluation of in-situ test technology for Qc/Qa during construction of pavement layers and embankments," Birzeit University, 2003.
- [18] T. Zoltán, "Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 97–102, 2008.
- [19] J. Arriero, "Mesure des modules de portance des sols traités : étude des paramètres du Défectomètre Léger à Masse Tombante (LFD), comparaison avec des techniques établies ARRIERO," 2009.