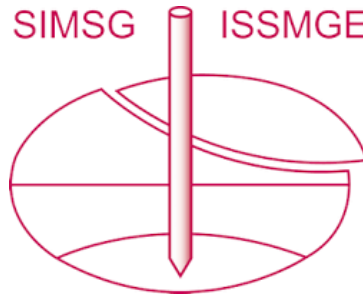


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA®

Sebastián LÓPEZ^{a,1}, Miguel BENZ^b y Philippe MOUSTAN^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 Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP) ASTM 6951 es uno de los ensayos más utilizados para el control y dimensionamiento de proyectos de infraestructura en los Estados Unidos y en algunos países de Asia y América del Sur. El DCP se presenta como una prueba de aplicación sencilla y económica que también cuenta con una gran cantidad de datos disponibles en la literatura sobre su uso y aplicabilidad en diferentes proyectos de movimiento de tierras y tipos de suelo. Sin embargo, tiene desventajas intrínsecas asociadas con el principio de funcionamiento rústico y el análisis de datos, presentando una baja capacidad de penetración contra suelos más duros y una disminución en la confiabilidad de las mediciones. El Penetrómetro de cono dinámico ligero de energía variable PANDA® (NF-P-94-105) es ampliamente utilizado en Francia y se usa cada vez más en los países europeos, algunos países asiáticos y sudamericanos, como Chile (NCh 3261/2012). El equipo PANDA® tiene ventajas sobre el DCP, pues aumenta la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos in situ, además de presentar una mayor versatilidad y tiempos de aplicación más cortos. Además, el alto rendimiento permite evaluar de manera fácil y económica la variabilidad espacial de las características del suelo. A pesar de todo, el penetrómetro PANDA® es poco conocido en el continente americano. En este trabajo, se propone una metodología de análisis y correlación entre los resultados de DCP y PANDA® aplicable a diferentes tipos de suelos y condiciones de operación, basada en un experimento de laboratorio y ensayos de campo. Los resultados muestran una buena coincidencia entre los resultados de la prueba DCP y PANDA® utilizando las correlaciones propuestas, lo que permite el uso de la base de datos histórica de pruebas DCP con la aplicación de ensayos PANDA®.

Palabras Clave. Ensayo de penetración dinámica, penetrómetro PANDA®, penetrómetro de cono dinámico, DCP.

1. Introducción

Los ensayos de penetración dinámicos mediante punta cónica son una técnica ampliamente empleada en la auscultación de suelos y la caracterización mediante el análisis del comportamiento de la penetración.

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

Los ensayos de penetración dinámica basan su fundamento de análisis en la penetración que genera una punta al hincarla en el suelo, mediante la acción de una masa de golpeo, la cual puede ser constante o variable.

El Penetrómetro de Cono Dinámico ASTM 6951 (DCP) [1] es uno de los equipos más empleados y ha sido objeto de estudios y análisis que han permitido la conformación de una vasta base de datos que caracterizan los suelos y sus parámetros en función de la penetración inducida en el suelo. Este penetrómetro ha sido empleado principalmente para control de la estructura de suelo de obras viales.

El Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable PANDA (NF 94-105), es ampliamente usado en Francia y su uso se incrementa en el resto de Europa y algunos países de Asia y Sudamérica.

El empleo del penetrómetro dinámico PANDA, ha sido diverso, siendo empleado principalmente para el control de obras de infraestructura vial, control geotécnico de estructuras mineras, caracterización geotécnica de suelos y más actualmente en análisis de suelos agrícolas.

Se presentan las principales características de los equipos DCP y PANDA, informando sobre su modo de uso y potencialidades en el control geotécnico de obras de ingeniería, además de la metodología empleada para permitir la contrastación de resultados, así mismo, se discuten las correlaciones que se han obtenido de la aplicación de ambos ensayos en materiales granulares comúnmente usados en construcción.

El presente documento explora la posibilidad de acceder a la extensa base de datos generada para el uso del equipo DCP en el control y dimensionamiento de proyectos de infraestructura, mediante el ensayo de penetración dinámica PANDA, aprovechando las ventajas de precisión y versatilidad de este equipo.

Los resultados muestran la posibilidad de aplicar correlaciones para la homologación de los modelos desarrollados para el equipo DCP en función de la resistencia de punta del equipo PANDA, lo que permite la aplicación de las formulaciones ampliamente divulgadas en la bibliografía.

2. Penetrómetros dinámicos ligeros

2.1. Penetrómetro de Cono Dinámico DCP

El Penetrómetro de Cono Dinámico ASTM 6951 (DCP) [1], es un equipo que permite la medición de la penetración de una punta en el suelo, mediante el golpeo de una masa de 4,6 o 8 kilogramos, el cual se deja caer desde una altura normalizada de 57.5 cm, por una barra de guía. La carga dinámica de hincia, es transmitida a la punta mediante un tren de barras de longitud predeterminada (Figura 1).

El equipo DCP, ha sido empleado mayormente en el control de compactación y espesores de capas de bases y sub bases de caminos, además de su empleo mediante correlaciones para el análisis de diferentes parámetros del suelo tales como CBR, modulo resiliente, modulo dinámico (E_{twaf}), entre otros [2-8].

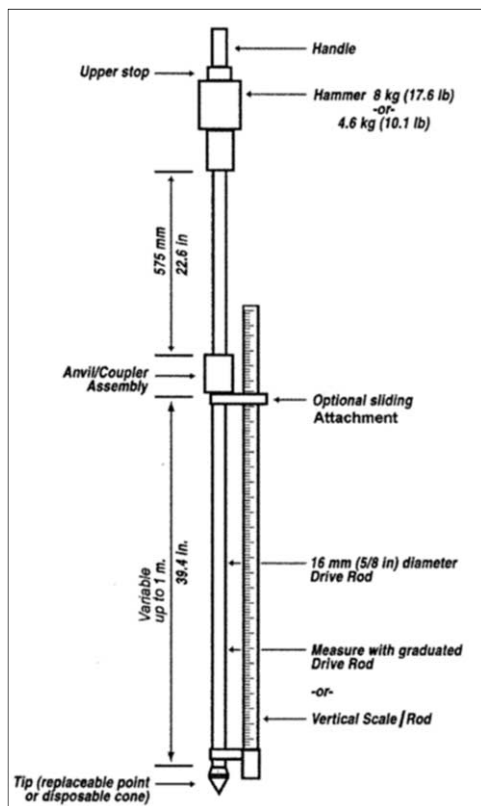


Figura 1. Esquema del equipo DCP [1].

2.2. Penetrómetro Dinámico Ligero PANDA 2

El Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable PANDA XP P 94-105 [9] es un penetrómetro ampliamente usado en Francia y es cada vez más empleado en el resto de Europa y algunos países de Asia y Sudamérica.

En Francia ha sido utilizado en el control de bases de líneas férreas, caminos y otras obras de ingeniería [10-13], donde se ha probado como un equipo y metodología confiable y versátil, permitiendo sondear suelos hasta 6 metros de profundidad.

Debido a que basa su funcionamiento en hinca mediante energía variable, el equipo permite la ejecución de ensayos de penetración en suelos con densidades en las cual el equipo DCP no es aplicable, por lo que su empleo se ha masificado a otras áreas de la ingeniería tales como la minería, análisis de estabilidad de suelos, caracterización geomecánica de suelos, entre otras aplicaciones [14-22].

El equipo PANDA es un penetrómetro que mide la resistencia del suelo a la penetración inducida por una punta cónica de 2, 4 y hasta 10 cm². Es accionado por medio del golpe de un martillo sobre un cabezal instrumentado con captadores especialmente dispuestos para la medición la energía de cada golpe (Figura 2). El cabezal es montado en un tren de barras. Los datos son almacenados en un equipo de registro y análisis de datos (TDD) que permite la visualización y análisis de los resultados de forma inmediata.

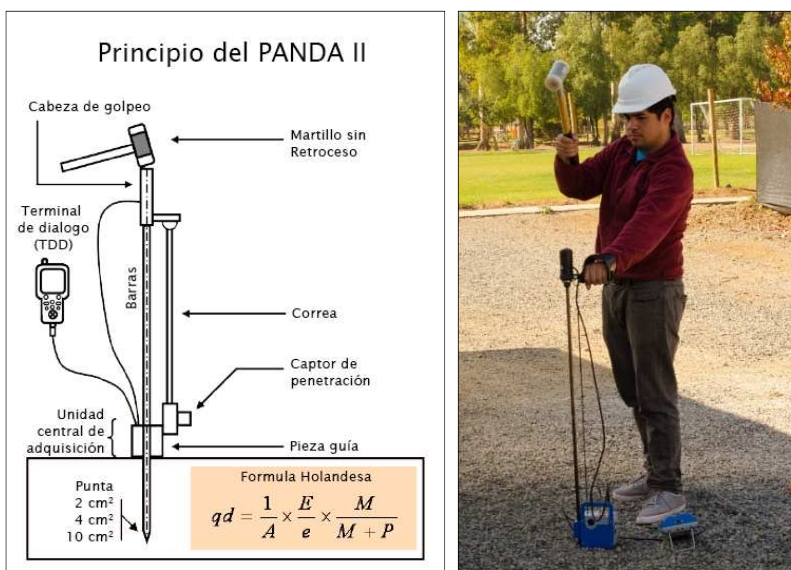


Figura 2. Esquema del equipo PANDA 2 (XP P 94-105).

Cada golpe dado durante el sondeo para el hincado de la punta (e), genera una energía que es registrada y procesada de forma inmediata. Estos datos permiten calcular la resistencia dinámica de punta mediante la fórmula holandés de hinca (1) [23].

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

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.

Para su empleo en control de compactación, el equipo debe ser calibrado previamente, estableciendo las formulaciones que relacionan las resistencias de punta superficial (q_{d0}) y bajo la profundidad crítica (q_{d1}) con la densidad drenada del suelo (γ_d), además de establecer la profundidad crítica (Figura 3).

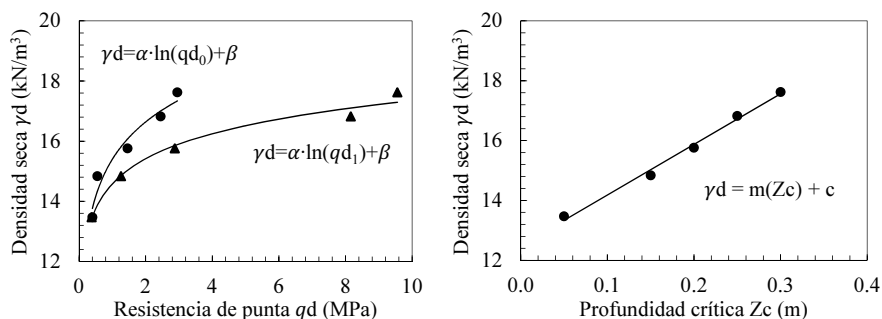


Figura 3. Relación Resistencia de Punta (q_d) - Densidad seca (γ_d) (a), relación profundidad crítica (Z_c) - Densidad seca (γ_d).

Los modelos obtenidos son una característica intrínseca de cada suelo y permite la generación de penetrogramas referenciales para el control de la compactación en terreno [9].

3. Correlaciones DCP – PANDA®

En base a análisis de resultados de ensayos realizados con Penetrómetro de Cono Dinámico DCP y Penetrómetro Dinámico Ligerero PANDA, se han presentado diferentes correlaciones dirigidas a la posibilidad de homologar los resultados de ambos aparatos (2-4) [24]. Estos ensayos han sido llevados a cabo tanto en terreno como en laboratorio y han relacionado tanto el valor DCPI del equipo DCP como las resistencias de punta calculadas por medio de la fórmula de los holandeses [23].

$$q_{d\text{PANDA}} = 108,7 \cdot (\text{DCPI})^{-1} \quad (2)$$

$$q_{d\text{PANDA}} = 98,8 \cdot (\text{DCPI})^{-1} \quad (3)$$

$$q_{d\text{PANDA}} = 112,3 \cdot (\text{DCPI})^{-1} \quad (4)$$

En base a las correlaciones antes presentadas, se ha indicado que el empleo del promedio de las 3 expresiones anteriores representaban una correlación razonable entre los dos equipos [24].

$$q_{d\text{PANDA}} = 106,6 \cdot (\text{DCPI})^{-1} \quad (5)$$

De datos recopilados en la práctica profesional de la geotecnia y la aplicación de los ensayos en la empresa Sol-Solution [24], se ha establecido una relación experimental entre la resistencia de punta tanto del equipo PANDA y como del penetrómetro DCP (6), al cual se le aplicó la fórmula holandesa en base a la energía constante que genera la masa de golpeo.

$$q_{d\text{DCP}} = 0,88 \cdot q_{d\text{PANDA}} \quad (6)$$

4. Materiales y métodos

Para el establecimiento de una correlación entre los resultados de la aplicación de ensayos de penetración con equipo PANDA y DCP, se ejecutaron ensayos en laboratorio a diferentes tipos de suelo, los cuales además fueron dispuestos en moldes normalizados (Figura 4), con diferentes energías de compactación para obtener un espectro variado de densidades para un mismo tipo de suelo. Por otra parte, se realizaron ensayos en terreno con ambos penetrómetros.

Los ensayos penetrométricos en laboratorio fueron realizados sobre muestras de arenas Fontainebleau, grava arenosa y arena gruesa. Para cada tipo de suelo se realizaron 5 probetas de gran tamaño (Figura 4), y con diferentes grados de compactación. El

llenado de los moldes y la aplicación de energía de compactación fue realizada de forma tal que la densidad fuera homogénea dentro de la probeta.

Los ensayos en terreno fueron realizados sobre rellenos granulares arenosos controlados y no controlados.

En cada probeta y sitio se realizaron ensayos PANDA 2 y DCP de forma de obtener resultados comparables, procurando mantener la distancia mínima entre puntos para evitar que las perturbaciones generadas en el suelo afecten los resultados del otro ensayo.

Para comparar los ensayos penetrométricos, se procesaron los resultados del equipo DCP por medio de la aplicación de la formulación de los holandeses [23], para obtener la resistencia de punta generada por la penetración. Además, fue necesario realizar un tratamiento de suavizado y regularizados de los datos.

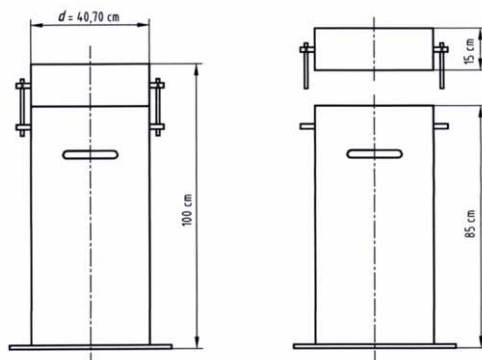


Figura 4. Molde normalizado [25].

El alisado permite disminuir el ruido generado en los resultados del sondaje y consiste en cálculo de una media móvil considerando una cantidad definida de puntos (7).

$$qd_{med} = \frac{1}{Z_b - Z_a} \cdot \sum \left[\frac{(q_{d_{i+1}} + q_{d_i})(Z_{i+1} - Z_i)}{2} \right] \quad (7)$$

donde Z = Profundidad, q_d = Resistencia de punta, $Z_b - Z_a$ = Profundidad mínima y máxima del intervalo de alisado.

El regularizado se aplicó para obtener valores de resistencia de punta a intervalos y profundidades equivalentes entre ensayos, permitiendo así obtener correlaciones que se consideran a una misma profundidad en cada probeta.

5. Análisis y discusión de resultados

Para realizar un análisis de los datos obtenidos, se analizan considerando los resultados de laboratorio y terreno con la finalidad de establecer un criterio de aplicación asociado al método de calibración empleado, así mismo, se realiza un análisis del conjunto de datos para establecer una correlación general.

Los resultados muestran una relación lineal entre las resistencias de punta de ambos ensayos y para su análisis se ha establecido el criterio de emplear la función que señala la intersección en el origen para obtener un factor único de conversión entre los

resultados de los ensayos. Si bien esta hipótesis hace variar los valores de la intersección de la recta con el eje de las ordenadas y la pendiente de la recta, se considera que la variación de la bondad de ajuste es despreciable.

Del mismo modo, para el análisis de resultados, se consideraron las resistencias de punta bajo la profundidad crítica (Z_c), con la finalidad de reducir los efectos de borde en superficie.

Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio muestran una mayor bondad de ajuste respecto de aquellos obtenidos en terreno, así mismo, los distintos tipos de suelos ensayados en laboratorio mostraron un factor de correlación similar (Figura 5).

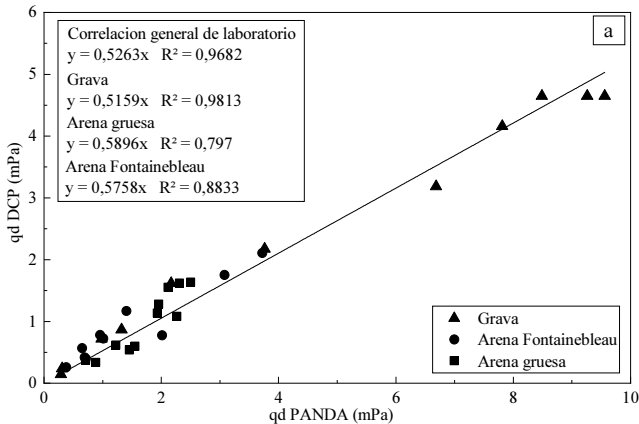


Figura 5. Correlación de resultados de ensayos realizados en laboratorio.

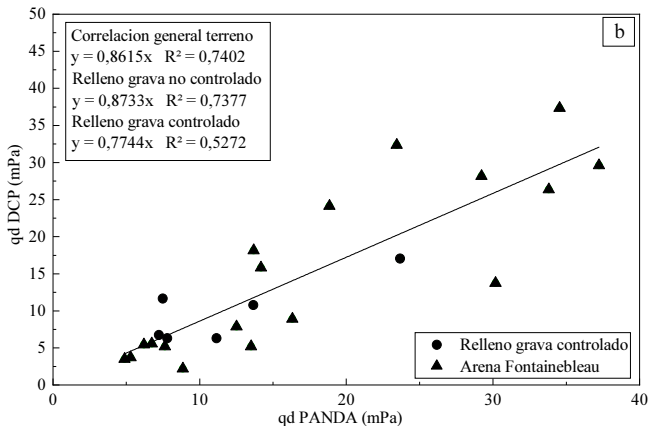


Figura 6. Correlación de resultados de ensayos realizados en terreno.

De los ensayos llevados a cabo en laboratorio, se observó que una buena correlación entre el ensayo DCP y PANDA 2 queda establecida por:

$$qd_{DCP} = 0,5263 qd_{PANDA2} \quad (8)$$

Los resultados de ensayos realizados en terreno (Figura 6) mostraron una mayor dispersión en la correlación y resultados más cercanos a los reportados en investigaciones anteriores [24]. Esto es concordante al considerar que los datos reportados [24], fueron obtenidos de ensayos realizados en terreno. De los ensayos realizados en terreno, se observó que una buena correlación entre el ensayo DCP y PANDA 2 queda establecida por:

$$qd_{DCP} = 0,8615 qd_{PANDA2} \quad (9)$$

Al realizar un análisis de todos los ensayos (Figura 7), se observó una función de correlación más aproximada a la propuesta por Benz 2019 [24]. Se obtuvo una correlación entre el ensayo DCP y PANDA 2 establecida por:

$$qd_{DCP} = 0,8451 qd_{PANDA2} \quad (10)$$

Si bien se observa una diferencia significativa entre las correlaciones obtenidas para ensayos de terreno y laboratorio, es importante recalcar que ambos casos son aplicables a diferentes funciones y métodos de calibración del equipo PANDA 2 [9], esto es, calibración en laboratorio (Función B), y calibración in situ por medio de canchas de prueba (Función C).

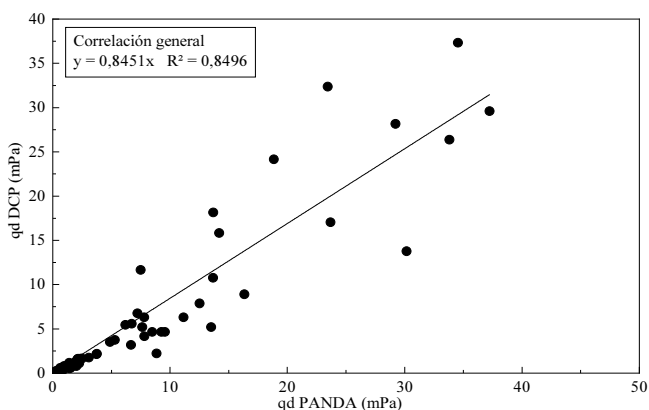


Figura 7. Correlación resultados de ensayos realizados in situ.

6. Conclusiones

En base a las correlaciones obtenidas se concluye que es posible homologar los resultados de análisis de ensayos DCP y PANDA 2 mediante correlaciones, las cuales pueden ser empleadas para las aplicaciones de datos previamente establecidos para el ensayo DCP, sin embargo, se debe tener cuidado de delimitar el rango de aplicabilidad de las correlaciones propuestas, pues se observa una diferencia entre los resultados obtenidas entre ensayos realizados en laboratorio y en terreno.

Las correlaciones obtenidas son aplicables a suelos granulares de características similares a los analizados, sin embargo, puede ser empleadas como valores referenciales para suelos similares.

Finalmente, se concluye que existe una correlación entre los resultados arrojados por la aplicación del ensayo DCP y PANDA, sin embargo, es necesaria la realización de más estudios tendientes a aumentar la precisión de las correlaciones entre los equipos.

Referencias

- [1] ASTM, ASTM D6951/D6951M-09 *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. United States, 2009, pp. 1-7.
- [2] L. N. Mohammad, A. Herath, M. Y. Abu-farsakh, K. Gaspard, and R. Gudishala, "Prediction of Resilient Modulus of Cohesive Subgrade Soils from Dynamic Cone Penetrometer Test Parameters," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 11, pp. 986-992, 2008.
- [3] A. Herath, L. Mohammad, K. Gaspard, R. Gudishala, and M. Abu-Farsakh, "The use of dynamic cone penetrometer to predict resilient modulus of subgrade soils," in *GeoFrontiers*, 2005, pp. 1-16.
- [4] E. G. Kleyn, *The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*. Transvaal Provincial Administration, 1975.
- [5] K. George and W. Uddin, "Subgrade characterization for highway pavement design," Mississippi, 2000.
- [6] F. Amini, "Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in mdot pavement design and construction," Mississippi, 2003.
- [7] M. D. Nazzal, "Field evaluation of in-situ test technology for Qc/Qa during construction of pavement layers and embankments," Birzeit University, 2003.
- [8] V. George, N. C. Rao, and R. Shivashankar, "PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 189-199, 2009.
- [9] 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.
- [10] E. Escobar, M. B. Navarrete, R. Gourvès, P. Breul, and B. Chevalier, "Dynamic Characterization of the Supporting Layers in Railway Tracks using the Dynamic Penetrometer Panda 3 ®," *Int. Conf. Transp. Geotech.* (ICTG 2016), vol. 143, no. 1ctg, pp. 1024-1033, 2016.
- [11] E. Escobar et al., "Reconnaissance dynamique des sites ferroviaires a l'aide du penetrometre PANDA 3®," in *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*, 2014.
- [12] Y. Haddani, P. Breul, G. Saussine, M. A. Benz, F. Ranvier, and R. Gourvès, "Trackbed Mechanical and Physical Characterization using PANDA ® / Geoendoscopy Coupling," in *International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)*, 2016, vol. 143, no. 1ctg, pp. 1201-1209.
- [13] L. Chaigneau, R. Gourves, and D. Boissier, "Compaction control with a dynamic cone penetrometer," in *International Workshop on Compaction of Soils, Granulates and Powders*, 2000, pp. 103-109.
- [14] R. Espinace A et al., "pénétrömètre 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] T. Tsuchida, A. M. R. G. Athapaththu (I), S. Kano, and K. Suga, "Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic (Masado) slopes using lightweight dynamic cone penetrometer," *Soils Found.*, vol. 51, no. 3, pp. 497–512, 2011.
- [22] A. M. R. G. Athapaththu, T. Tsuchida, and S. Kano, "A new geotechnical method for natural slope exploration and analysis," *Nat Hazards*, vol. 75, pp. 1327–1348, 2015.
- [23] B. Frazer, "Formulas de hinca dinámica," *Rev. Obras Pública*, pp. 977–990, 1971.
- [24] M. Benz, "Méthodologie d'évaluation d'ouverture et fermeture des pistes en herbe d'aérodromes d'ADP à l'aide d'un pénétrömètre dynamique ultraléger sur mesure," *Riom*, 2009.
- [25] INN, NCh3261-2012 - *Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero*. Chile, 2012.