

Evaluación de la impedancia mecánica de suelos mediante ensayos de penetración dinámica de energía variable

Mechanical impedance evaluation of soils by variable energy dynamic penetration tests

Fecha de entrega: 6 de marzo 2025

Fecha de aceptación: 4 de abril 2025

Sebastián López-Retamales¹, Miguel Benz-Navarrete², Jean Canou³, Jean-Claude Dupla³ y María Francisca Toro⁴

¹ Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile, sebastian.lopezr@uss.cl (Orcid: 0000-0003-2719-1209)

² Sol-Solution, Géotechnique Réseaux, Riom, Francia, mbenz@sol-solution.com (Orcid : 0000-0001-8679-8794)

³ Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier/CERMES, Marne la Vallée, Champs sur Marne, Francia, canou@cermes.enpc.fr, dupla@cermes.enpc.fr (Orcid: 0000-0001-7042-7390)

⁴ Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Construcción Civil, Macul, Chile.

La caracterización del suelo mediante ensayos de penetración dinámica (DPT) ha sido realizada mediante el establecimiento de parámetros geotécnicos obtenidos de la aplicación de correlaciones basadas en índices de penetración y en menor medida mediante mediciones directas. Esta característica produce una disminución en la precisión y variedad de los parámetros geotécnicos posibles de evaluar en terreno mediante DPT. El propósito de este artículo es presentar una metodología de evaluación de la impedancia mecánica del suelo Z_s mediante la aplicación de un método de desacople y reconstrucción de ondas y probar el potencial diferenciador de este parámetro entre dos tipos de arenas diferentes. Se realizaron ensayos DPT de energía variable empleando un penetrómetro instrumentado con sensores de deformación y acelerómetro (PANDA 3) sobre especímenes de arenas Hostun HN31 y Fontainebleau NE34 reconstituídos en estado seco en una cámara de calibración k_0 . Los resultados mostraron que es posible la evaluación del valor de impedancia mecánica mediante la aplicación del método de desacople y reconstrucción de señales dinámicas de fuerza y velocidad en la interfaz cono-suelo para cada impacto de martillo sobre el penetrómetro dinámico.

Palabras clave: ensayo de penetración dinámica, DPT, impedancia mecánica, energía variable, interfaz cono-suelo

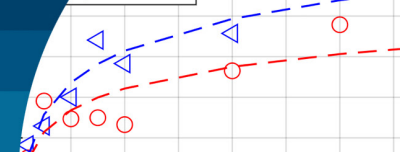
Soil characterization by dynamic penetration testing (DPT) has been performed by establishing geotechnical parameters obtained from the application of correlations based on penetration indices, dynamic driving equations and to a lesser extent by direct measurements. This characteristic produces a decrease in the precision and variety of the geotechnical parameters that can be evaluated in the field by means of a DPT. To improve the accuracy in soil characterization, the evaluation of new geotechnical parameters based on measurements directly obtained in the penetration equipment is an alternative. The purpose of this paper is to present a methodology for the evaluation of soil mechanical impedance Z_s by applying a decoupling and wave reconstruction method and to test the differentiating potential of this parameter between two different types of sands. Variable energy DPT tests were performed employing an instrumented penetrometer with strain sensors and accelerometer (PANDA3) on Hostun HN31 and Fontainebleau NE34 sand specimens reconstituted in dry state in a k_0 calibration chamber. The results showed that the evaluation of the mechanical impedance value in the two types of sands tested is possible by applying the decoupling method and reconstructing dynamic force and velocity signals at the cone-soil interface for each hammer impact on the dynamic penetrometer.

Keywords: dynamic penetration test, DPT, mechanical impedance, dynamic driving energy, cone-soil interface

Introducción

En la ingeniería geotécnica se emplean usualmente los ensayos de penetración dinámica para caracterizar las propiedades de un suelo y obtener así datos relevantes para

el diseño de las diferentes tipologías estructurales. Sin embargo, la evaluación de los resultados de estos ensayos requieren de un análisis que incluye múltiples factores que influyen en los resultados, tales como: tipo de suelo, con-



diciones de saturación, condiciones de operación, tipo de equipo empleado, método de análisis y evaluación de los resultados, entre otros.

El análisis y evaluación de los resultados de los ensayos, se realiza aplicando métodos basados en la aplicación de relaciones teórico-empíricas y métodos basados en el análisis de ondas. Las relaciones teórico-empíricas se basan en el establecimiento de correlaciones obtenidas entre índices de penetración y parámetros geotécnicos comúnmente empleados en el diseño geotécnico o mediante la aplicación de la ley de conservación de energía para la obtención de ecuaciones teóricas, mediante la cual es posible la evaluación de parámetros como la resistencia dinámica. Los métodos basados en el análisis de ondas permiten la evaluación de señales dinámicas (Benz, 2009a; Benz-Navarrete *et al.*, 2022; López Retamales, 2022), a partir de las cuales se obtienen mediciones tales como deformación, fuerza y energía de hincia dinámica mediante mediciones directas en el penetrómetro.

La diversidad de métodos de evaluación de los resultados de un ensayo *DPT*, resultan también en análisis basados en hipótesis que no concuerdan entre los diferentes métodos, es por esto que el establecimiento de nuevos parámetros asociados a mediciones contribuye a la disminución de las incertidumbres en la evaluación de parámetros a través de ensayos *DPT*.

El presente artículo tiene por objetivo contribuir a la evaluación de las características del suelo mediante ensayos *DPT*, extendiendo las posibilidades de caracterización con la evaluación de parámetros como la impedancia mecánica Z_s . Para esto, se presenta una metodología basada en el análisis de ondas en el penetrómetro y su interacción con el suelo. Con este fin, se emplea una metodología basada en el desacople y reconstrucción de ondas, mediante la cual es posible la reconstrucción de las señales de fuerza y velocidad en la interfaz cono-suelo. Para la obtención de la impedancia mecánica Z_s se emplea la polar de choque, la cual relaciona de manera directa la fuerza y velocidad en la interfaz cono suelo.

Para obtener las mediciones de fuerza y velocidad de ondas, se realizaron ensayos de penetración dinámica de energía variable *DPT*, sobre especímenes de arenas Hostun HN31 y Fontainebleau NE34 reconstituidos a un índice de densidad I_D de 0.5. Los especímenes fueron reconstituido en una cámara de calibración k_0 (Le, 2014) mediante el

método de depositación seca.

Se empleó un penetrómetro dinámico PANDA 3® (Benz, 2009a), el cual se encuentra instrumentado con sensores de deformación y acelerómetros, los cuales, mediante la aplicación de la ley de Hooke, permiten evaluar la fuerza de la onda generada por un golpe y mediante integración de la señal de aceleración, permite la evaluación de la velocidad particular de la onda de compresión.

El artículo está estructurado en cuatro secciones principales. En la primera parte se introducen los elementos generales asociados a la investigación y el propósito de la investigación, luego, se describen las arenas empleadas en los ensayos *DPT* (Fontainebleau NE34 y Hostun HN31). También se presentan las características de la cámara de calibración k_0 y del equipo empleados durante la experiencia de laboratorio. Para comprender las bases de la metodología, se presentan los métodos de análisis de las ondas basado en el desacople y reconstrucción de las señales. Se presentan los resultados de la evaluación de la impedancia mecánica del suelo Z_s para los dos tipos de arena ensayadas. Finalmente se presentan las principales conclusiones asociadas a la obtención del parámetro Z_s y su relación con el tipo de suelo y el esfuerzo vertical efectivo aplicado durante el ensayo.

Materiales y métodos

Material granular

Dos arenas fueron empleadas en la ejecución de ensayos *DPT*: Fontainebleau NE34 y Hostun HN31. Las arenas Fontainebleau NE34, están compuestas principalmente por sílice en un 98%, se distingue por su granulometría uniforme y una alta resistencia a la rotura. Visualmente, se presenta con un color beige claro y sus granos suelen exhibir formas redondeadas a semirredondeadas (Benahmed, 2001; López Retamales, 2022). Para este estudio, se establecieron valores de relación de vacíos mínima y máxima, $e_{min} = 0.55$ y $e_{max} = 0.85$ respectivamente, utilizando un método estandarizado (AFNOR, 2000). Hostun HN31 posee un 99% de sílice en su composición y, presenta granulometría uniforme, color gris claro y granos entre angulares a subangulares. Los valores de deformación definidos fueron de $e_{min} = 0.67$ y $e_{max} = 1.03$ (AFNOR, 2000; López Retamales, 2022). Los parámetros geotécnicos de ambas arenas se presentan en la Tabla 1.

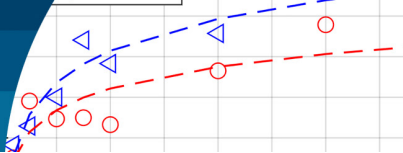


Tabla 1: Características geotécnicas de arenas Hostun HN31 y Fontainebleau NE34

Parámetro	HN31	NE34
G_s , g/cm ³	2.65	2.65
D_{50} , mm	0.35	0.21
C_u	1.57	1.52
ρ_{min} , g/cm ³	1.33	1.37
ρ_{max} , g/cm ³	1.60	1.72

Cámara de calibración

La cámara de calibración k_0 (Figura 1), desarrollada en el laboratorio Navier de la Ecole des Ponts ParisTech (Le, 2014), es un equipo con la capacidad de reproducir cargas verticales en condiciones de reposo sobre especímenes reconstituidos. Este equipo está compuesto por dos cilindros, una base, un anillo central, una cubierta superior y un sistema de carga vertical con la capacidad de producir un esfuerzo efectivo vertical σ'_{vo} de hasta 600 kPa. La configuración de la cámara permite reconstituir especímenes de 55 cm de diámetro y 73 cm de altura.

Para la aplicación de σ'_{vo} se dispone de una membrana de caucho extensible sobre el espécimen reconstituido, debajo de la tapa superior, la cual es accionada mediante presión hidráulica controlada. Para asegurar la hermeticidad del sistema los elementos se sellan mediante juntas tóricas y se genera una fijación mediante barras hiladas y tuercas para garantizar su estabilidad.

Para realizar ensayos de penetración dinámica de energía variable bajo condiciones controladas de carga vertical,

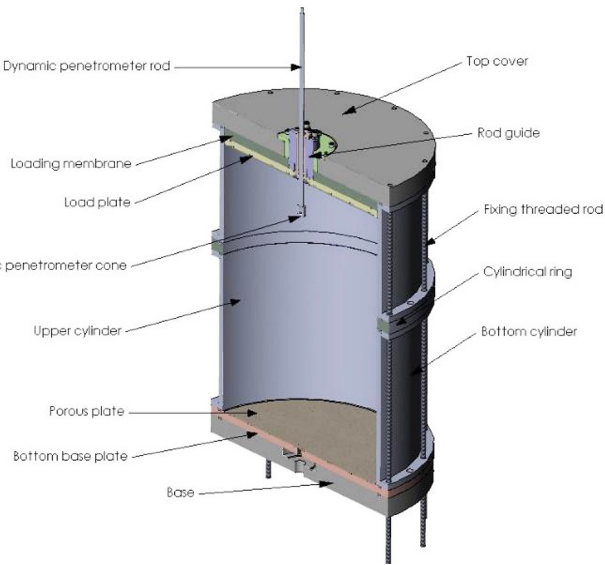


Figura 1: Esquema de la cámara de calibración

se realizaron modificaciones en la cubierta superior de la cámara. Estas modificaciones permitieron la aplicación de energía variable durante la hinca y la implementación de un programa de cargas verticales incrementales para capturar la respuesta del suelo en diferentes condiciones (López Retamales, 2022).

Penetrómetro dinámico de energía variable

Se empleó el penetrómetro dinámico de energía variable DPT PANDA 3 (Figura 2) (Benz, 2009b; Benz *et al.*, 2022; Gourvès, 1991; Langton, 1999), desarrollado en Francia en 1990. Este equipo ha sido ampliamente utilizado en diversas tipologías de proyectos de ingeniería, abarcando áreas como la minería, vías ferroviarias, aeropuertos, entre otros (Benz *et al.*, 2013; Escobar *et al.*, 2014; Escobar Valencia *et al.*, 2016; Espinace *et al.*, 2013; López Retamales *et al.*, 2020, 2021; López *et al.*, 2018, 2019, 2021; López y Benz, 2019).

El equipo PANDA 3 cuenta con sensores de aceleración y deformación con rangos de medición de 20000g y ± 45 kN (aplicando ley de Hooke), respectivamente. La integración de la señal de aceleración permite obtener mediciones de velocidad, mientras que la aplicación de la ley de Hooke

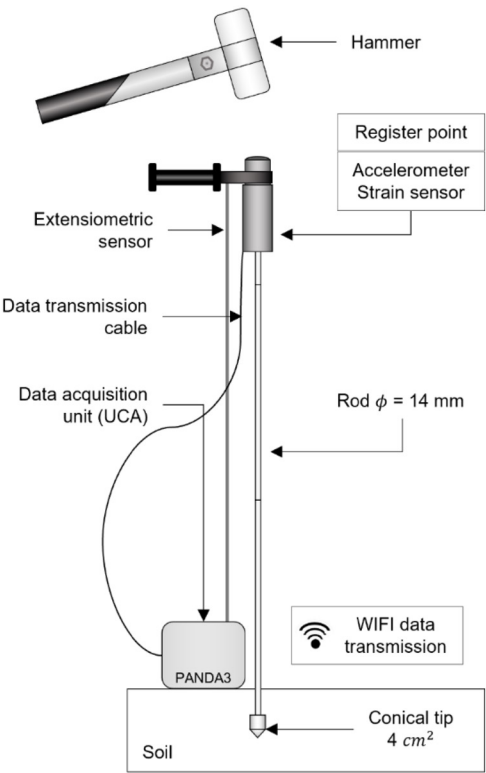


Figura 2: Esquema general del penetrómetro dinámico de energía variable DPT.

considerando la medición de deformación permite el registro de una señal de fuerza.

Las mediciones son registradas en una unidad central de adquisición de datos UCA (francés: *Unité d'Acquisition de Données*), que procesa y almacena las señales y datos de los sensores. Transmite los datos de manera inalámbrica a un dispositivo móvil para su visualización e interpretación. La UCA incluye un sensor conectado a la cabeza de golpeo que permite registrar la trayectoria de desplazamiento del penetrómetro y la profundidad de penetración.

El ensayo analiza las señales dinámicas de fuerza y velocidad de cada impacto del martillo en el dominio temporal y frecuencial. Esto permite evaluar parámetros geotécnicos como el módulo elástico dinámico E_{kd} , velocidad de onda de compresión C_p , impedancia mecánica Z_s , resistencia dinámica q_d , entre otros (Benz, 2009a; López Retamales, 2022; Tran *et al.*, 2018, 2019).

Mediante la aplicación de la teoría de ondas, es posible analizar las señales dinámicas registradas en cada impacto del martillo. Este enfoque se fundamenta en las características morfológicas del penetrómetro, permitiendo analizar el sistema con un enfoque unidimensional. Considerando esto, se supone una velocidad de propagación de ondas constante (c_r), así como un comportamiento elástico de las barras del penetrómetro, su homogeneidad material y sección transversal uniforme. Además, se considera que las fuerzas externas aplicadas sobre las barras son despreciables (Benz, 2009a).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_r} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

La ecuación de onda unidimensional puede ser analizada mediante la solución de D'Alembert, la cual propone la superposición de dos ondas que se propagan en direcciones opuestas: una onda incidente u_i y una onda reflejada u_r .

$$u(x, t) = u_i(x - c_r t) + u_r(x + c_r t) \quad (2)$$

La medición de u_i y u_r en un punto conocido x_a del equipo, en conjunto con un método de desacople y reestructuración de ondas, permite la determinación de las velocidades particulares $v(x, t)$, deformaciones $\varepsilon(x, t)$, desplazamientos

$u(x, t)$ y tensiones $\sigma(x, t)$. Este método permite la obtención de las señales reconstruidas en cualquier punto x_n a lo largo del penetrómetro.

Desacople y reconstrucción de ondas

El impacto del martillo sobre el cuerpo del penetrómetro genera una onda que se desplaza de forma descendente y ascendente a través del equipo de penetración. Este proceso provoca el fenómeno de superposición de ondas, por lo que resulta necesario aplicar un método de desacople que permita separar las ondas incidentes y reflejadas como se muestra en la Figura 3 (Casem *et al.*, 2003; Jung *et al.*, 2006; Lundberg y Henchoz, 1977).

En el caso del penetrómetro PANDA 3 se determinó que el método que mejor se adapta a las características del equipo es el propuesto por Casem *et al.* (2003) (Benz, 2009a). Este método emplea mediciones de deformación $\varepsilon_A(t)$ y velocidad $v_A(t)$ (ecuaciones (3) y (4)), para la obtención de las ondas incidentes u_i y las ondas reflejadas u_r en un punto determinado de medición x_a .

$$\varepsilon_d(x - ct) = \frac{1}{2} \varepsilon_A(t) - \frac{1}{2c} v_A(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon_r(x + ct) = \frac{1}{2} \varepsilon_A(t) + \frac{1}{2c} v_A(t) \quad (4)$$

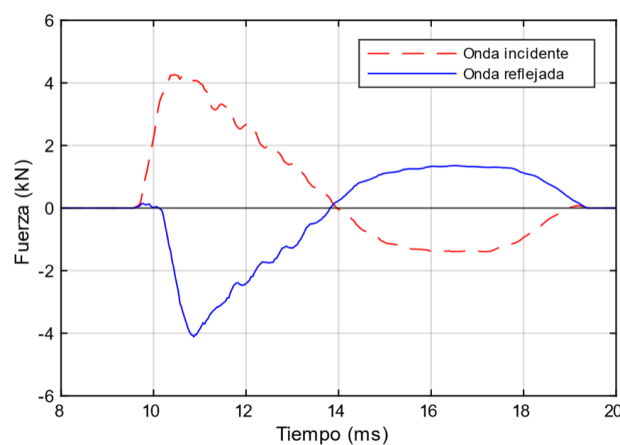


Figura 3: Desacople de ondas incidentes y reflejadas.

En el caso de los penetrómetros, las condiciones de aplicación de este método no se cumplen. Los efectos de fricción lateral están presentes a lo largo de las barras embebidas en el suelo, no obstante, en el caso de la configuración em-

pleada en esta investigación, los efectos de esta fuerza se consideran despreciables (Aoki y Cintra, 2000; Lukiantchuki, 2012; Odebrecht, 2003; Odebrecht *et al.*, 2005; Schmertmann, 1978; Schmertmann y Palacios, 1979; Schnaid *et al.*, 2007).

Por otro lado, la uniformidad del medio de propagación no se cumple en los puntos de unión entre barras y en la unión barra-cono, sin embargo, es posible la aplicación de un proceso iterativo de desacople y reconstrucción de señales dinámicas en cada punto de cambio de impedancia (ecuaciones (5) y (6)), hasta alcanzar la interfaz cono-suelo (Benz, 2009a; Benz-Navarrete *et al.*, 2022).

Una vez obtenidas las señales de fuerza $F_i(t)$ y velocidad $V_i(t)$ reconstruidas en la interfaz cono-suelo (Figuras 4 y 5), es posible la construcción de una curva carga desplazamiento dinámico (Figura 6), la cual representa la respuesta del suelo frente a la carga dinámica impuesta por el cono sobre el suelo.

$$F_N(t) = \frac{1}{2} \left[F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)}) \right] + \frac{Z_n}{2} \left[v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)}) \right] \quad (5)$$

$$v_N(t) = \frac{1}{2} \left[v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)}) \right] + \frac{1}{2Z_n} \left[F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)}) \right] \quad (6)$$

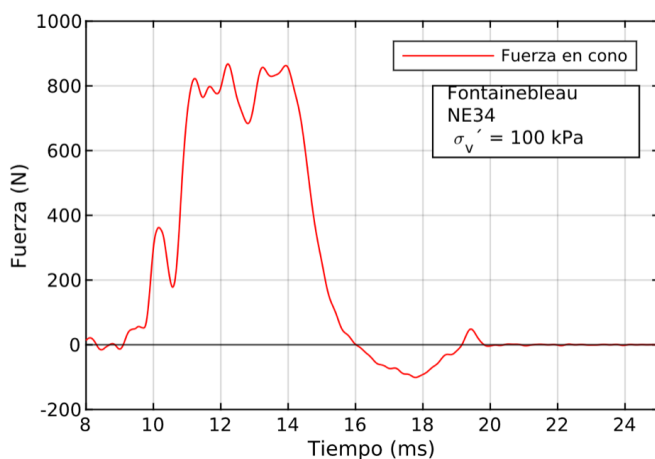


Figura 4: Registro de fuerza en interfaz cono-suelo.

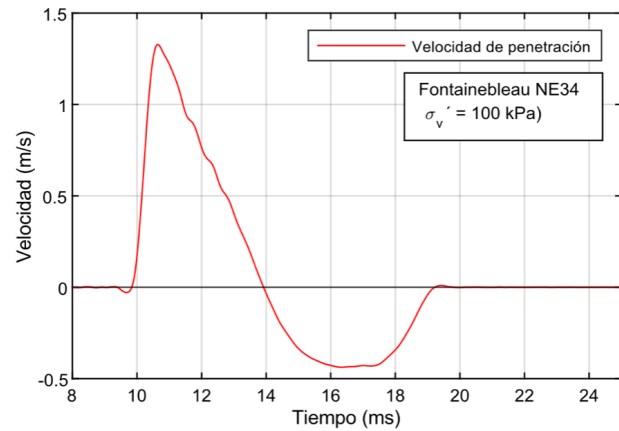


Figura 5: Registro de velocidad en interfaz cono-suelo.

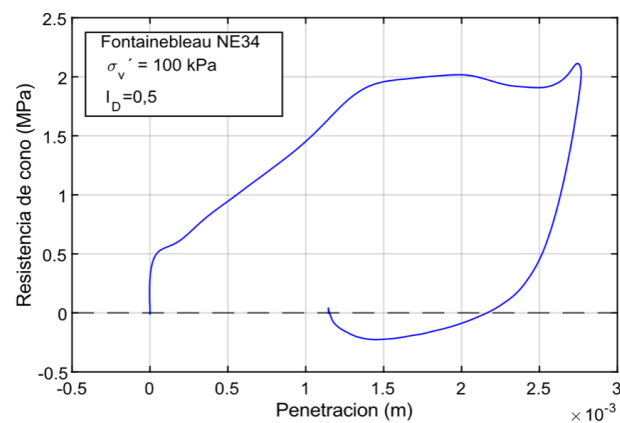


Figura 6: Curva carga desplazamiento dinámico.

Evaluación de la impedancia mecánica en suelos granulares

La impedancia mecánica es un parámetro que permite cuantificar la resistencia que se opone a un elemento a que se desplace. De esta forma Z , relaciona la fuerza aplicada sobre un elemento y la velocidad que este alcanza durante su desplazamiento. En el caso del empleado en esta investigación, se aplica el método de la polar de choque (Tran *et al.*, 2019; Aussedat, 1970; Oularbi, 1989; Benz, 2009; Benz-Navarrete *et al.*, 2022; Iskander *et al.*, 2015; Lodygowski and Rusinek, 2014; Meunier, 1974; Omidvar *et al.*, 2014; Oularbi and Levacher, 2009). Este método permite el análisis de la propagación de ondas de un medio a otro cuando se producen cambios de impedancia.

Si las mediciones de fuerza F_p y v_p velocidad transmitidas al suelo se encuentran disponibles es posible construir la polar de choque en el intervalo de tiempo en el cual ocurre la primera reflexión del frente de onda ($t_0 + 2\frac{l_r}{c_r}$). La rela-

ción entre F_p y v_p permite construir una relación lineal dada por la impedancia mecánica (Figura 7), la cual es representada por la ecuación (7).

$$F_p = Z_s v_p \quad (7)$$

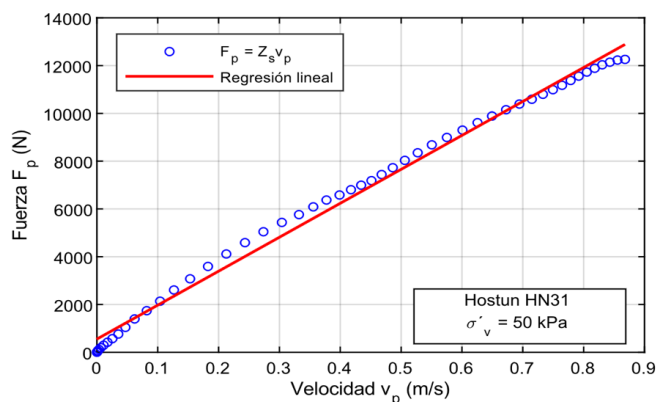


Figura 7: Relación Velocidad-Fuerza en la interfaz cono-suelo.

Procedimiento experimental

Se realizaron ensayos *DPT* para obtener y registrar las señales de fuerza y deformación dinámicas y evaluar la impedancia mecánica en dos diferentes tipos de suelos, se reconstituyeron dos especímenes de arena. Un espécimen de arenas Hostun HN31 y otro de arenas Fontainebleau NE34. Para reconstituir los especímenes se empleó el método de depositación seca por capas para alcanzar el índice de densidad de 0.5. Se compactó el espécimen hasta alcanzar la densidad objetivo y la altura preestablecida de 70 cm de alto.

Para captar la respuesta del suelo, bajo un amplio rango de esfuerzos verticales, se aplicaron cargas verticales efectivas en intervalos crecientes de manera escalonada desde los 10 kPa y hasta los 400 kPa (10, 25, 50, 75, 100, 200, 300 y 400 kPa).

En cada impacto de martillo sobre la cabeza de golpeo del penetrómetro se registraron las señales de deformación y aceleración, las cuales, mediante el método de desacople y reconstrucción de señales, permitió obtener las señales de fuerza y velocidad en la interfaz cono-suelo.

Para disminuir los efectos de las condiciones de borde en los análisis de resultados, se excluyeron del análisis los re-

sultados de impactos dinámicos ejecutados hasta alcanzar una profundidad de 10 cm y aquellos impactos que se encuentran a 10 cm del fondo de la cámara de calibración.

Resultados experimentales

Las señales de fuerza y deformación generadas por la onda de compresión fueron registradas en el contorno de la cabeza de golpeo para impacto dinámico en los especímenes de arenas Hostun HN31 y Fontainebleau NE34. Se aplicó el método de desacople y reconstrucción para obtener las señales de fuerza y velocidad en la interfaz cono-suelo para construir la polar de choque y obtener el valor de la impedancia mecánica

En la Figura 8 se presentan los resultados de las relaciones establecidas entre las señales de fuerza F_p y velocidad v_p para dos impactos dinámicos realizados sobre el espécimen reconstituido de arenas Fontainebleau NE34 y Hostun HN31, ambos sometidos a un esfuerzo vertical efectivo σ'_{v0} de 200 kPa. En la Figura 8 se puede observar que es posible establecer una relación lineal entre el origen de la señal y el intervalo de tiempo $(t_0 + 2\frac{l_r}{c_r})$ en el cual las señales no son perturbadas por los efectos de superposición de ondas, para ambos suelos ensayados.

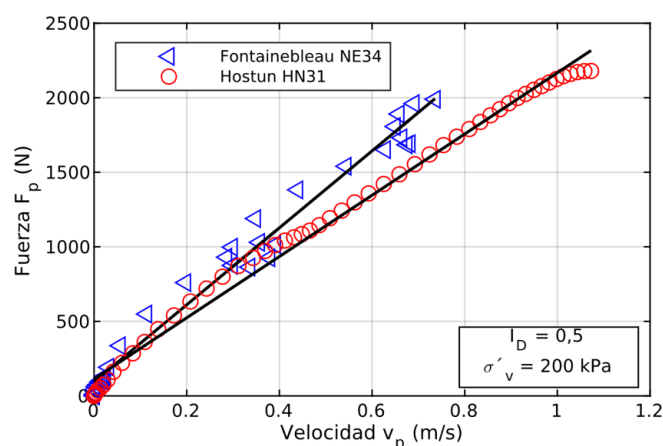


Figura 8: Relación F_p - v_p en interfaz cono-suelo para dos impactos dinámicos en los tipos de suelo ensayados.

En la Figura 9 se presenta un penetrograma de valores de impedancia mecánica obtenido para cada impacto de martillo sobre el penetrómetro, en un ensayo realizado sobre un espécimen de arenas Fontainebleau NE34 reconstituido a un I_D de 0.5. En la Figura 9 se observa la presencia de algunos puntos anómalos. Estos puntos anómalos

se relacionan con los efectos de impactos excéntricos, los que generan deformaciones perpendiculares al sentido de desplazamiento del frente y provocan una interacción con elementos de la cámara de calibración, sin embargo, la ocurrencia de estos puntos responde a accidentes aislados. La exclusión de estos no afecta la evaluación de la impedancia mecánica.

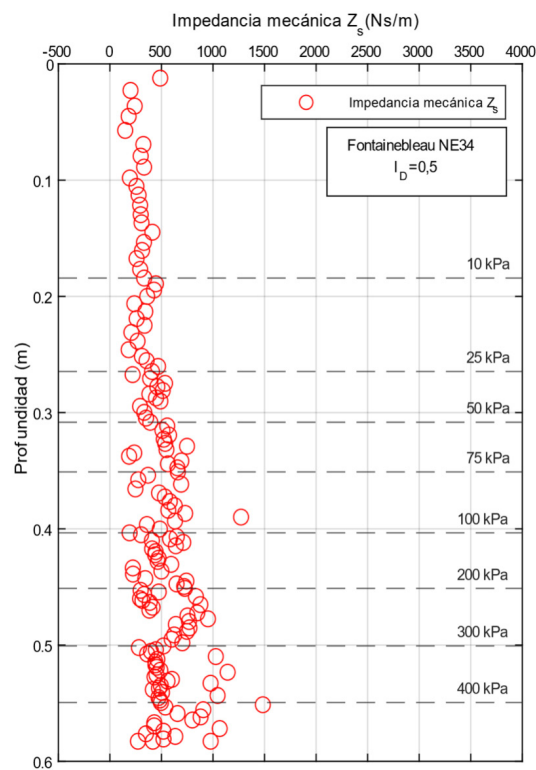


Figura 9: Penetrograma de impedancias mecánicas en espécimen de arenas Fontainebleau NE34

Tabla 2: Valores medios de impedancia mecánica

σ'_v	HN31, Ns/m	NE34, Ns/m	Z_{sm}
10	250.81	282.70	12.72
25	390.78	329.20	-15.76
50	346.93	400.21	15.36
75	349.72	540.81	54.64
100	332.70	483.00	45.18
200	465.15	557.28	19.81
300	578.66	697.99	20.62
400	543.16	656.75	20.91

Para obtener un parámetro representativo a diferentes niveles de carga efectiva vertical, fue obtenido el valor promedio de impedancia mecánica asociado a cada nivel de carga efectiva vertical. La Tabla 2 presenta un resumen de

resultados de valores promedio de impedancia mecánica para los ensayos realizados, en función de los esfuerzos efectivos verticales aplicados sobre el espécimen. Los resultados muestran que en general los valores de impedancia mecánica de arenas Fontainebleau NE34 son mayores entre un 12% y hasta en un 54 % sobre aquellos valores obtenidos en las arenas Hostun HN31. De los resultados obtenidos, se estableció que la relación entre la impedancia mecánica del suelo y el esfuerzo efectivo vertical σ'_v puede ser representada por una función logarítmica compuesta de un factor α y otro β de la forma:

$$Z_s = \alpha \ln \sigma'_v + \beta \tag{8}$$

La Figura 10 presenta las relaciones establecidas entre el esfuerzo efectivo vertical y la impedancia mecánica para los especímenes ensayados. Los resultados muestran que la relación puede ser ajustada mediante la consideración de una función logarítmica como la presentada en la ecuación (8). De la gráfica se desprende que la impedancia mecánica aumenta con el incremento de la carga efectiva vertical, sin embargo, se observó una mayor dispersión de los valores de impedancia mecánica a bajos niveles de esfuerzo efectivo vertical (10 kPa a 100 kPa).

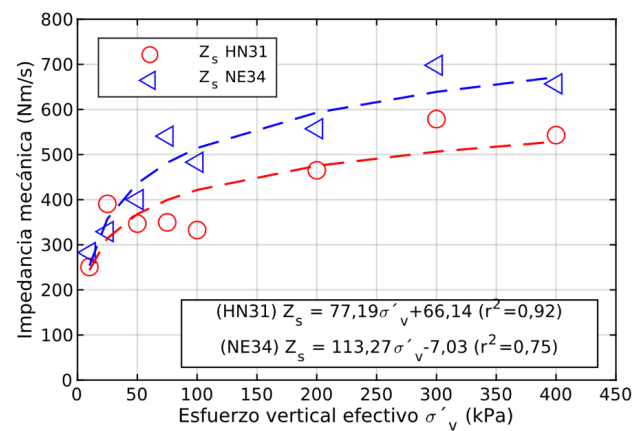


Figura 10: Relación $Z_s - \sigma'_v$ para especímenes ensayados.

Por otro lado, los resultados muestran que la impedancia mecánica es un parámetro característico de cada suelo ensayado en este estudio, por lo que puede ser empleado como parámetro de diferenciación entre dos suelos, sin embargo, es necesario evaluar otros tipos de suelos para identificar otras variables que se asocian con la variación de este parámetro.

Conclusiones

Se presentó una metodología para la evaluación de la impedancia mecánica del suelo mediante ensayos de penetración dinámica de energía variable sobre especímenes reconstituidos de arenas Hostun HN31 y Fontainebleau NE34 en una cámara de calibración k_0 , en la cual se aplicaron diferentes esfuerzos efectivos verticales sobre los especímenes. Los resultados de la aplicación del método de evaluación de la impedancia mecánica del suelo para cada impacto dinámico de martillo sobre el penetrómetro fueron presentados mediante la aplicación del método de desacople y reconstrucción de ondas y la construcción de la polar de choque a diferentes niveles de carga efectiva vertical.

Los resultados obtenidos permiten concluir que es posible la evaluación de la impedancia mecánica para cada impacto de un DPT de energía variable, permitiendo describir paramétricamente la respuesta del suelo.

Al analizar los resultados de la evaluación y análisis de las mediciones, y considerando los tipos de arenas ensayados, se concluye que la impedancia mecánica es un parámetro intrínseco de cada tipo de suelo, por lo que puede ser empleado en la caracterización de estos, sin embargo, se requiere de un análisis de un mayor número de suelos para establecer un punto de comparación más extenso.

Con respecto a los esfuerzos efectivos verticales aplicados a los especímenes, es posible indicar que la magnitud de la impedancia mecánica es sensible a la variación del esfuerzo efectivo vertical, describiendo una relación en la cual, mientras mayor sea la carga efectiva vertical aplicada, mayor será la magnitud de la impedancia mecánica.

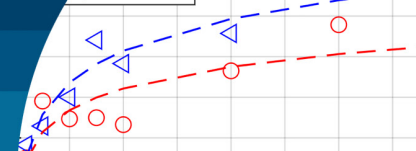
Aunque el uso de *DPT* tiene larga trayectoria a lo largo de la práctica de la ingeniería geotécnica, el uso de energía variable y la aplicación del método de desacople y reconstrucción de ondas permite extender las posibilidades de aplicación de estos equipos, permitiendo la evaluación de un mayor número de parámetros geotécnicos y mejorar así las posibilidades de aplicación y precisión de los resultados obtenidos.

Agradecimientos

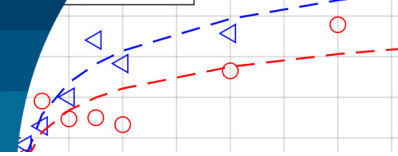
Agradecimientos al proyecto francés FUI EMeRGER (Elaboration des Méthodes de Reconnaissance Géotechnique de 3eme Génération, 2018-2022), por el financiamiento parcial del proyecto.

Referencias

- AFNOR (2000). NF P94-059 Soils : investigation and testing - Determination of minimal and maximal density of cohesionless soils. Association française de Normalisation, France
- Aoki, N. and Cintra, J.C.A. (2000). The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT test. *6th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. S. Niyama and J. Bein (eds.), 457–460
- Aussedat, G. (1970). *Sollicitations rapides des sols*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France
- Benahmed, N. (2001). *Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité y cyclique*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Pont et Chaussées, France
- Benz, M. (2009a). *Mesures dynamiques lors du battage du penetrometre panda 2*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II, France
- Benz, M. (2009b). *Méthodologie d'évaluation d'ouverture et fermeture des pistes en herbe d'aérodromes d'ADP à l'aide d'un pénétromètre dynamique ultraléger sur mesure*. Riom, France
- Benz-Navarrete, M.A., Breul, P. and Gourvès, R. (2022). Application of wave equation theory to improve dynamic cone penetration test for shallow soil characterisation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14(1), 289–302.
- Benz, M.A., Escobar, E., Gourvès, R., Haddani, Y., Breul, P. & Bacconnet, C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 499–502
- Casem, D.T., Fourney, W. and Chang, P. (2003). Wave separation in viscoelastic pressure bars using single- point measurements of strain and velocity. *Polymer Testing* 22(2), 155–164
- Escobar, E., Benz, M.A., Haddani, Y., Lamas, F., Calon, N., Aguiar, S.C.D. (2014). Reconnaissance dynamique des sites ferroviaires a l'aide du penetrometre PANDA 3®. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Beauvais, France



- Escobar Valencia, E.J., Benz Navarrete, M.A., Gourvès, R., Breul, P., Chevalier, B. (2016). In-situ determination of soil deformation modulus and the wave velocity parameters using the Panda 3®. *5th Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*, Acosta-Martínez & Kelly (eds.), Australian Geomechanics Society, vol. 1, 279–284
- Espinace, R., Villavicencio, G., Palma, J., Breul, P., Bacconnet, C., Benz, M.A., Gourvès, R. (2013). Stability of Chilean's tailings dams with the Panda® penetrometer. Experiences of the last 10th. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 519–522
- Gourvès, R. (1991). Le PANDA : pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand, France
- Iskander, M., Bless, S. and Omidvar, M. (2015). *Rapid penetration into granular media : visualizing the fundamental physics of rapid earth penetration*. Elsevier
- Jung, B., Park, Y. and Park, Y. (2006). Longitudinal acceleration wave decomposition in time domain with single point axial strain and acceleration measurements. *The 8th International Conference on Motion and Vibration Control*, 1-6
- Langton, D.D. (1999). The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Ground Engineering* **9**, 33-37
- Le, van C. (2014). *Étude sur modèle physique du renforcement des sols par colonnes en « Soil-Mix » : application aux plates-formes ferroviaires*. Thèse de doctorat, Université Paris – Est, France
- Lodygowski, T. and Rusinek, A. (eds.) (2014). *Constitutive relations under impact loadings*. Springer, Vienna, Austria, vol. 552.
- López Retamales, S. (2022). *Development of a method to evaluate the risk of liquefaction of sands from a dynamic penetrometer test*. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, France
- López Retamales, S., Canou, J., Dupla, J.C., Benz Navarrete, M. (2021). Development of a liquefaction risk assessment methodology using an instrumented lightweight dynamic penetrometer: calibration chamber tests. *6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site*, T. Huszák, A. Mahler and E. Koch (eds.), Budapest, Hungary
- López Retamales, S., Canou, J., Dupla, J.C., Benz Navarrete, M. A. (2020). Penetrometre dynamique et indice de densité des sables. Application a l'évaluation du risque de liquéfaction des massifs sableux. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. Lyon, France
- López, S. y Benz, M. (2019). Comparación de los ensayos de penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA® ensayo de placa de carga estática y dinámica. *XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, N.P. López-Acosta et al. (eds.), Cancún, México, 1562–1571
- López, S., Benz, M., Navarro, J. y Zamora, D. (2018). Control geotécnico de obras viales mediante penetrómetro dinámico ligero de energía variable PANDA 2. *X Congreso Chileno de Geotecnia*, Valparaíso, Chile
- López, S., Benz, M. y Moustán, P. (2019). Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA®. *XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, N.P. López-Acosta et al. (eds.), Cancún, México, 1552-1561
- López, S., Dupla, J.C., Canou, J. and Benz, M. (2021). Evaluation of soil liquefaction resistance with variable energy dynamic penetration test, PANDA®: state of the art. *6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site*. T. Huszák, A. Mahler and E. Koch (eds.)
- Lukiantchuki, J.A. (2012). *Interpretação de resultados do ensaio spt com base em instrumentação dinâmica*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, São Paulo, Brasil
- Lundberg, B. and Henchoz, A. (1977). Analysis of elastic waves from two-point strain measurement. *Experimental Mechanics* **17**(6), 213–218
- Meunier, J. (1974). *Contribution à l'étude des ondes et des ondes de choc dans les sols*. Université Joseph Fourier Grenoble, France
- Odebrecht, E. (2003). *Medidas de energia no ensaio SPT*. PhD thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
- Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M.M. and de Paula Bernardes, G. (2005). Energy efficiency for standard penetration tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **131**(10), 1252–1263.



- Omidvar, M., Iskander, M. and Bless, S. (2014). Response of granular media to rapid penetration. *International Journal of Impact Engineering* **66**, 60-82.
- Oularbi, A. (1989). *Applicabilité des mesures dynamiques au calcul des pieux*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France
- Oularbi, A. and Levacher, D. (2009). Réponse dynamique de la pointe d'un modèle de pieu dans un sol granulaire. *Coastal and Maritime Mediterranean Conference*, 49–52.
- Schmertmann, J. (1978). The statics and dynamics of the standard penetration test. *Symposium on Site Exploration in Soft Ground Using in Situ Techniques*, 145–205
- Schmertmann, J. and Palacios, A. (1979). Energy dynamics of SPT. *Journal of Geotechnical Engineering Division* **105**(8), 909–926
- Schnaid, F., Odebrecht, E. and Rocha, M.M. (2007). On the mechanics of dynamic penetration tests. *Geomechanics and Geoengeineering* **2**(2), 137–146.
- Tran, Q.A., Benz Navarrete, M.A., Breul, P., Chevalier, B., Moustas, P., (2019). Soil dynamic stiffness and wave velocity measurement through dynamic cone penetrometer and wave analysis. *XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, N.P. López-Acosta et al. (eds.), Cancún, México, 401–408
- Tran, Q.A., Chevalier, B. and Breul, P. (2018). Spectral analysis of the response of coarse granular material to dynamic penetration test modelled with DEM. *International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering* **4**(3): 22.