

# CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELOS. APLICACIÓN AL ESTUDIO DE RELAVES

Dynamic characterization of soils. Application to the study of tailings

Rubén Ruiz Bravo<sup>a</sup>, Ángel Tijera Carrión<sup>a</sup>, Koldobika Sánchez Arroategui<sup>b</sup>, Víctor Parra Arroyo<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Laboratorio de Geotecnia, España.

<sup>b</sup> Sandfire Matsa, España.

**RESUMEN** – En el ámbito de la ingeniería civil, el estudio de las propiedades dinámicas de los suelos es fundamental para estudiar cómo pueden verse afectadas sus propiedades ante sollicitaciones de tipo cíclico o dinámico con diferentes niveles de deformación. En este artículo se realiza una introducción a la dinámica de suelos, indicando las propiedades más comúnmente estudiadas y las diferentes técnicas que pueden utilizarse para ello. Además, como aplicación práctica, se incluye parte del estudio dinámico llevado a cabo sobre relaves mediante el ensayo sísmico de campo de registro con sonda PS, y mediante las técnicas de laboratorio de corte directo simple cíclico, columna resonante y elementos Bender. De esta forma, pudo obtenerse un estudio completo de dicho material en un amplio rango de deformaciones. Los resultados fueron consistentes entre técnicas, generando una curva de degradación completa y validando un enfoque integral para evaluar dinámicamente los relaves y su evolución temporal.

**ABSTRACT** – In the field of civil engineering, the study of the dynamic properties of soils is essential to understand how their characteristics may be affected under cyclic or dynamic loads at various deformation levels. This paper introduces soil dynamics, highlighting the most studied properties and the different techniques used for their analysis. As a practical application, it includes part of the dynamic study conducted on tailings using the PS logging field test and laboratory techniques such as cyclic direct simple shear, resonant column and Bender elements. This approach enabled a comprehensive analysis of the material across a wide range of deformations. The results were consistent across techniques, producing a complete degradation curve and validating an integrated approach to dynamically evaluate tailings and their temporal evolution.

**Palabras Clave** – dinámica de suelos, velocidad de ondas, relaves.

**Keywords** – soil dynamics, wave velocity, tailings.

## 1 – INTRODUCCIÓN

La dinámica de suelos es una rama fundamental de la mecánica de suelos donde se estudia el comportamiento del terreno y su respuesta cuando es sometido a esfuerzos o deformaciones de tipo cíclico o dinámico. Adquiere una relevancia crítica en la ingeniería civil, ya que permite comprender y predecir cómo los suelos responden a sollicitaciones de este tipo, un aspecto clave para garantizar la estabilidad y seguridad de infraestructuras en entornos sujetos a fenómenos dinámicos. También

---

E-mails: Ruben.Ruiz@cedex.es (R. Ruiz), Angel.Tijera@cedex.es (A. Tijera), koldobika.sanchez@sandfire.com.au (K. Sánchez), victor.parra@sandfire.com.au (V. Parra).

ORCID: orcid.org/0000-0001-9850-6760 (R. Ruiz), orcid.org/0000-0002-2763-7867 (A. Tijera), orcid.org/0009-0003-3705-3472 (K. Sánchez), orcid.org/0009-0002-2022-5664 (V. Parra).

es fundamental en el análisis de patologías debido al desconocimiento o falta de previsión sobre la posible incidencia de fenómenos dinámicos, o cuando sea necesario conocer la respuesta del suelo al someterlo, por ejemplo, a métodos vibratorios para mejorar sus propiedades geotécnicas.

Estas solicitaciones pueden tener su origen en diferentes fenómenos, tanto naturales como producidos por la actividad del hombre. Los más importantes y trascendentes en el campo de la ingeniería civil son los fenómenos sísmicos, la acción del oleaje o el viento, las debidas al tráfico, explosiones (demoliciones o voladuras) o las generadas por vibraciones de maquinaria en funcionamiento o por trabajos que puedan ejecutarse en el entorno y puedan generar este tipo de efectos sobre el suelo.

Los problemas que involucran cargas dinámicas sobre suelos pueden dividirse en dos categorías, una en la que se estudian fenómenos con una respuesta un rango de grandes deformaciones (del orden de  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$ ) como por ejemplo fenómenos sísmicos y explosiones, y otra donde se analiza la respuesta en el rango de bajas deformaciones (del  $10^{-4}$  y  $10^{-3}$ ) como por ejemplo en el caso de las cimentaciones de máquinas (Saran, 2021).

Las propiedades dinámicas de los suelos dependen del nivel de deformación impuesto y de ciertas características intrínsecas del material. La importancia de su estudio radica en su aplicación directa en el diseño sísmico y dinámico de obras civiles, permitiendo evaluar riesgos como los de licuefacción o amplificación sísmica y, en general, la estabilidad y sostenibilidad de las estructuras. Además, proporciona información clave para definir parámetros en modelos numéricos avanzados que simulan la interacción suelo-estructura bajo condiciones dinámicas.

Las propiedades dinámicas de los suelos pueden determinarse mediante ensayos de campo y de laboratorio, siendo interesante y recomendable la ejecución de varios de ellos para obtener una caracterización dinámica lo más completa y precisa posible.

En este artículo se presentan los conceptos fundamentales de la dinámica de suelos, las principales propiedades dinámicas estudiadas y su relevancia dentro de la ingeniería civil. Además, se indican los métodos más utilizados para su caracterización, su aplicabilidad y la información que de ellos puede obtenerse.

Como ejemplo de aplicación de la dinámica de suelos se presentan algunos resultados de ensayos realizados sobre relaves mineros por parte del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Los relaves son residuos generados durante el proceso de extracción de minerales, y su disposición segura es esencial para evitar riesgos medioambientales y estructurales a largo plazo. A lo largo de los años, estos pueden modificar sus propiedades bajo condiciones de carga dinámica debido a la acumulación y el comportamiento de estos materiales en los depósitos donde son vertidos. Para el análisis de estos efectos, los ensayos de caracterización dinámica son una herramienta fundamental para evaluar la estabilidad de los depósitos de relaves y prevenir fenómenos que pudieran comprometer la seguridad de las estructuras y por tanto de las personas y medioambiente.

## 2 – DINÁMICA DE SUELOS

Las solicitaciones dinámicas pueden tener sobre el suelo varios efectos. Pueden variar su estado tenso – deformacional disminuyendo sus propiedades resistentes, lo que se conoce como fatiga de suelos, o mejorarlas cuando se trata de métodos vibratorios de mejora del terreno. También pueden provocar, principalmente en suelos blandos, la pérdida total de su resistencia al corte debido al aumento de presiones intersticiales dando lugar al efecto conocido como licuefacción cuando se trata de suelos granulares. Este fenómeno puede considerarse el más fundamental y diferenciador frente a otros problemas de mecánica de suelos (Galindo-Aires, 2013). En otros casos pueden darse fenómenos de amplificación, donde el terreno actúa como un filtro sobre las ondas que viajan por él pudiendo atenuar ciertas frecuencias, pero amplificar otras, amplificando también el movimiento de la masa del terreno sobre la que actúan y, por tanto, pudiendo afectar a las estructuras asentadas.

El comportamiento tensión – deformación de un suelo sometido a una acción dinámica depende, por un lado, de varias propiedades intrínsecas del mismo, por otro, de las características propias de

la acción cíclica como son su amplitud y frecuencia, pero también de la tensión inicial del suelo. Si se parte de un estado tensional elevado, una sollicitación cíclica pequeña puede provocar un aumento sustancial en las deformaciones transversales provocando el fallo del material (Kramer, 1996).

Además de los efectos que pueden tener las sollicitaciones de tipo dinámico sobre el suelo mientras están actuando, puede ser importante considerar el estado o propiedades de los suelos una vez desaparecidas estas, es decir, evaluar su resistencia remanente o residual ya que puede haber una reducción de parámetros resistentes o reordenamiento de partículas que generen cambios de volumen importantes.

Es bien conocido qué características básicas de los suelos que definen su comportamiento mecánico, tales como densidad, índice de huecos o humedad, influyen de manera igualmente fundamental en el comportamiento que este tendrá bajo sollicitaciones de naturaleza tanto estática como dinámica. Lo mismo sucede con otros factores como la historia tensional del suelo o el nivel de deformación que ya tiene. Por tanto, puede concluirse que las características que distinguen la respuesta dinámica de un suelo, de la estática, se deben a la naturaleza del fenómeno que la produce (Ishihara, 1996).

Ishihara (1996) clasificó los procesos que puede sufrir un suelo en dinámicos o estáticos en función del número de ciclos de carga y descarga ocurridos y la duración de la carga en cada uno de ellos. Según esta clasificación, puede considerarse que se está bajo condición de carga dinámica cuando la duración de esta es inferior a unos 10 s. Por tanto, una característica fundamental de las sollicitaciones dinámicas es la corta duración en la aplicación de la carga o su alta frecuencia. A esto habrá que sumar, para el estudio de los efectos dinámicos sobre suelos, el número de veces que esta actúa. Fenómenos con relativamente pocos ciclos, como por ejemplo un sismo, pueden repercutir de manera catastrófica sobre un suelo lo mismo que la acción continuada (muchos ciclos) de otro fenómeno dinámico de menor entidad.

El hecho de que la alta frecuencia en la aplicación de una carga sea una característica fundamental en el análisis de la dinámica de suelos, es debido a las fuerzas de inercia que se generan y que gobiernan el comportamiento del suelo. Estas fuerzas de inercia aumentan en gran medida con el aumento de esta frecuencia, concretamente, para cargas cíclicas sinusoidales, dependen del cuadrado de dicha frecuencia. Debido a esto, en los problemas dinámicos se estudia el comportamiento del suelo incluso para deformaciones del orden de  $10^{-6}$  ya que pueden generar fuerzas de inercia decisivas si la frecuencia de la carga es suficientemente alta (Ishihara, 1996).

## 2.1 – Propiedades dinámicas de los suelos

Las propiedades dinámicas de los suelos son aquellas que controlan y definen su comportamiento ante sollicitaciones dinámicas y su correcta determinación es, por tanto, fundamental para predecir dicho comportamiento y estudiar cómo se ven afectados ante estos fenómenos.

Las principales propiedades que gobiernan los problemas dinámicos son: el módulo de deformación o de Young dinámico, módulo de rigidez transversal (de corte) dinámico, módulo volumétrico dinámico, coeficiente de Poisson, razón de amortiguamiento, y ciertas características de los ciclos de carga – descarga, como por ejemplo aquellas que definen el fenómeno de la licuefacción.

De las propiedades citadas anteriormente, las que más habitualmente suelen obtenerse en los análisis de los ensayos dinámicos son el módulo de rigidez transversal y el amortiguamiento, siendo esta última una propiedad exclusiva de los suelos sometidos a acciones cíclicas, que no tiene equivalente en los problemas estáticos, y que está relacionada con la capacidad que tiene el suelo de disipar energía durante la acción cíclica.

Para evaluar la respuesta de los suelos ante sollicitaciones cíclicas es imprescindible determinar el nivel de deformación al que se verán sometidos. En la Figura 1 se representan los modelos y métodos de análisis para determinar el comportamiento del suelo en función de la deformación

aplicada en tanto por uno (Ishihara, 1996). Para bajas deformaciones (menores que  $10^{-5}$ ) se utilizan modelos elásticos lineales en los que el módulo de corte es la propiedad del suelo clave para definir su comportamiento. Para un rango medio de deformaciones (entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$ ) se recurre a modelos elastoplásticos. En estos el módulo de corte se reduce al aumentar la deformación, y se produce una disipación de energía a medida que aumentan los ciclos de la carga que vendrá dada por lo que se denomina razón de amortiguamiento. Para este rango de deformaciones medias se puede hablar de un comportamiento del suelo de tipo hysterético no degradado y puede representarse, de manera razonable, mediante la teoría viscoelástica lineal y un método lineal equivalente definido por un rango de valores, de módulo y amortiguamiento, que será función de las deformaciones cortantes aplicadas. Para bajas deformaciones no se produce variación del módulo ni del amortiguamiento a pesar de aumentar los ciclos de carga. Por último, para grandes deformaciones y deformaciones cercanas a la rotura del terreno (por encima de  $10^{-2}$ ), las propiedades dinámicas de los suelos cambian de manera considerable con el nivel de deformación y con el número de ciclos presentando lo que se denomina comportamiento hysterético degradado. En estos casos se utilizan modelos en los que se analizan la historia tensional del suelo aplicando procedimientos numéricos de integración.

Deformación de corte	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
	Pequeñas deformaciones	Medias deformaciones		Grandes deformaciones		Deformaciones de rotura
Elástico	■					
Elasto - plástico		■				
Rotura						■
Efecto de repetición de carga				■		
Efecto de frecuencia de carga				■		
Modelo	Lineal elástico		Viscoelástico		Análisis de historia tensional	
Método de análisis de la respuesta	Lineal		Lineal equivalente		Integración paso a paso	

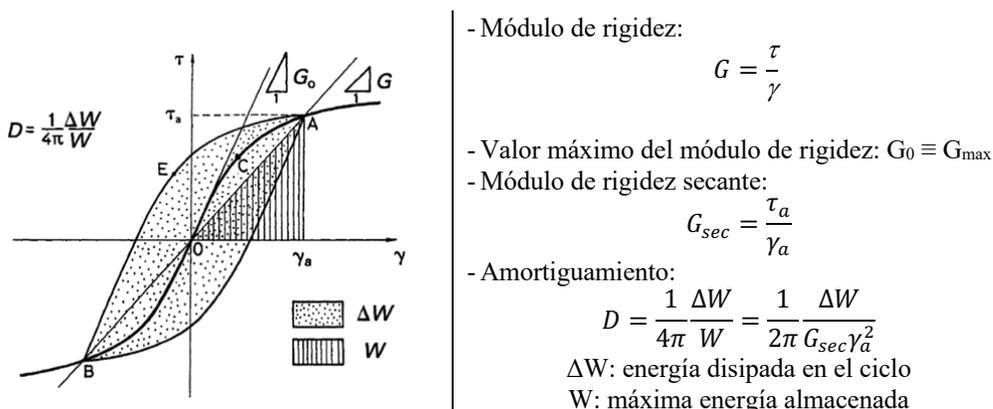
**Fig. 1** – Modelos y métodos de análisis para la determinación del comportamiento del suelo en función de la deformación aplicada en tanto por uno (reproducida de Ishihara, 1996).

Los modelos lineales equivalentes son los que mejor representan el comportamiento del suelo cuando se trata de fenómenos dinámicos que no producen una gran degradación. Para definir estos modelos hay que analizar las llamadas curvas de histéresis que se obtienen al representar los valores de esfuerzos y deformaciones procedentes de ensayos cíclicos, desarrollados sobre muestras de suelo. Cada ciclo dará lugar a lo que se conoce como lazo o ciclo de histéresis. A partir de estas curvas se obtiene importante información sobre los valores y variación de los módulos y propiedades dinámicas. En la Figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, un ciclo de histéresis que podría obtenerse de un ensayo dinámico de laboratorio y donde se analiza la deformación tangencial ( $\gamma$ ) en función de la variación de la tensión de corte ( $\tau$ ). En esta figura se incluye la manera de obtener los principales valores del módulo de rigidez dinámico ( $G$ ), y del amortiguamiento ( $D$ ).

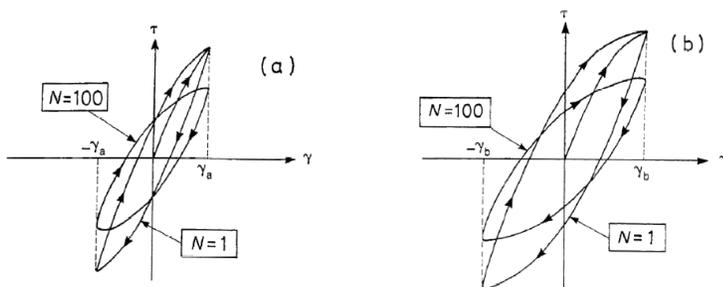
Las curvas de histéresis varían en función de la tensión de corte aplicada y, para una tensión fija, también en función del número de ciclos debido a los fenómenos de disipación de energía. Estos efectos se representan en la Figura 3.

En muchas ocasiones, para analizar la respuesta dinámica de un suelo, se recurre a la relación  $G/G_{max}$  (normalización del módulo de rigidez respecto de su valor máximo). De esta forma, para un suelo en unas condiciones concretas, y un rango de deformaciones determinado, podremos conocer la reducción de rigidez que sufrirá al aplicarle una deformación cíclica concreta. Este parámetro es frecuentemente utilizado para el diseño de estructuras en entornos que pueden sufrir acciones sísmicas.

En la variación de estas propiedades dinámicas influyen numerosos factores y características propias del suelo, tales como la presión de confinamiento, índice de huecos o plasticidad; y parámetros que definen la sollicitación cíclica como la frecuencia o el número de ciclos. Se conoce que la plasticidad es la principal característica que gobierna las variaciones del cociente  $G/G_{max}$  y la razón de amortiguamiento ( $D$ ) para una gran variedad de suelos saturados. Para un nivel de deformación determinado, una menor plasticidad aumenta el valor de  $G/G_{max}$  y reduce el amortiguamiento (Vucetic y Dobry, 1991).



**Fig. 2** – Ciclo de histéresis y determinación de los parámetros dinámicos: módulo de rigidez y amortiguamiento; que pueden obtenerse (Ishihara, 1996).



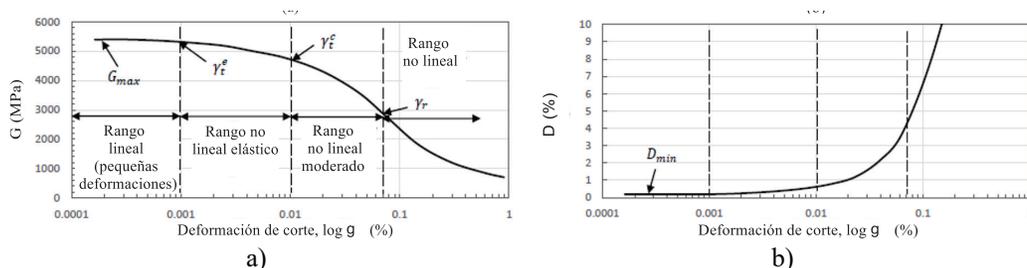
**Fig. 3** – Representación del primer ciclo de histéresis ( $N = 1$ ) y el ciclo después de aplicar 100 ( $N = 100$ ) para dos niveles de deformación distintos (siendo la deformación en (a) menor que en (b) (Ishihara, 1996).

### 3 – ENSAYOS DINÁMICOS

Para caracterizar el comportamiento dinámico de los suelos puede recurrirse a ensayos de campo y ensayos de laboratorio. Los ensayos de campo más habituales para estudios dinámicos se basan en métodos sísmicos, donde se analiza la propagación de ondas en el suelo para determinar su velocidad

de propagación. A partir de esta velocidad pueden obtenerse los módulos de deformación y rigidez dinámicos mediante unas fórmulas sencillas. Por otro lado, en los ensayos de laboratorio, se somete a muestras de suelo a sollicitaciones dinámicas de distinta naturaleza para medir su respuesta a través de las deformaciones o tensiones experimentadas. Ambos grupos de ensayos tienen sus ventajas y limitaciones y lo ideal es, siempre que sea posible, combinar varios tipos de ensayos para una mejor y más completa caracterización dinámica.

Los valores de los módulos dinámicos dependen del grado de deformación aplicado por lo que habrá que recurrir al ensayo o ensayos que cubran el rango de deformaciones de interés en cada caso. No existe un único ensayo con el que se pueda cubrir todo el rango de deformaciones que caracterice completamente el comportamiento dinámico de un material. En la Figura 4 se representa la variación del módulo de rigidez ( $G$ ) y del amortiguamiento ( $D$ ), en función de la deformación. Además, se definen varios rangos de deformación según la forma de variación del módulo. De menor a mayor deformación se tiene: el rango elástico lineal (para pequeñas deformaciones), el rango elástico no lineal, el rango moderadamente no lineal y el rango no lineal (Kakar, 2014).



**Fig. 4** – Propiedades dinámicas no lineales de un suelo granular confinado a la presión de una atmósfera. (a) Variación del módulo de rigidez ( $G$ ) en función de la deformación de corte. Se definen varios rangos de comportamiento en función del nivel de deformación. (b) Variación del amortiguamiento ( $D$ ) en función de la deformación de corte (Wang, 2015; Kakar, 2014).

En general, las principales ventajas de los ensayos de campo son el volumen de material ensayado, mayor que en los ensayos de laboratorio, y que las medidas se realizan sobre el material en las condiciones reales en las que se encuentra. Por el contrario, los niveles de deformación aplicados en estos métodos son en general pequeños, y por tanto sólo pueden obtenerse los valores máximos de los módulos de deformación a partir de ellos. Además, los parámetros dinámicos se obtienen de manera indirecta o a través de fórmulas o correlaciones (Kramer, 1996).

En cuanto a los ensayos de laboratorio, el principal factor a su favor es que permiten aplicar un rango de deformaciones mayor y más controlado, pero por contra, la reproducción en el laboratorio de las condiciones reales en las que se encuentra el suelo es compleja, a lo que hay que sumar la inevitable alteración del material durante la preparación de las probetas y la influencia que este proceso tiene sobre los resultados obtenidos (Kramer, 1996).

### 3.1 – ENSAYOS DE CAMPO

Dentro de los ensayos de campo los más habituales para el estudio de las propiedades dinámicas de los suelos consisten en técnicas sísmicas ejecutadas en superficie o en el interior de sondeos. Dentro del primer grupo las más comunes son la sísmica de refracción, la sísmica de reflexión y los métodos basados en la propagación de ondas superficiales. Y las técnicas habituales aplicadas en sondeos son el Cross-Hole, Down-Hole y la sonda de registro PS (o *PS-Logging* en denominación inglesa).

Las técnicas sobre superficie son en general más rápidas y menos costosas que las aplicadas en sondeos, pero por el contrario estas últimas permiten una interpretación más precisa y directa a diferentes profundidades, y ofrecen la posibilidad de obtener información extra del suelo como, por ejemplo, detalles sobre su caracterización que pueden determinarse visualmente o en laboratorio, o la localización del nivel freático (Kramer, 1996).

En general, estas técnicas se basan en la utilización de una fuente externa para generar una perturbación en el suelo e inducir así ondas mecánicas, tanto longitudinales (ondas P) como de corte (ondas S), y analizar su propagación para determinar su velocidad. Esta velocidad de propagación es característica del tipo de suelo y está directamente relacionada con sus propiedades mecánicas y dinámicas. Para ello se registran los trenes de ondas mediante sensores instalados bien en el terreno, o bien en los sondeos, en función de la técnica aplicada.

Considerado el suelo como un medio viscoelástico, la teoría de propagación de ondas establece que dicha propagación depende fundamentalmente de la rigidez y del amortiguamiento del mismo. A mayor rigidez, las ondas se propagarán a mayor velocidad, y a mayor amortiguamiento estas se atenuarán más rápidamente. Estos fenómenos son los que se consideran para la obtención de las propiedades dinámicas del suelo (Wang, 2015).

A partir de las velocidades de propagación de estas ondas P y S, y de la densidad ( $\rho$ ) del suelo, podrán determinarse el módulo de rigidez ( $G$ , ecuación 1), el módulo de Young ( $E$ , ecuación 2) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ , ecuación 3); para muy bajas deformaciones a partir de las siguientes ecuaciones:

$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad (1)$$

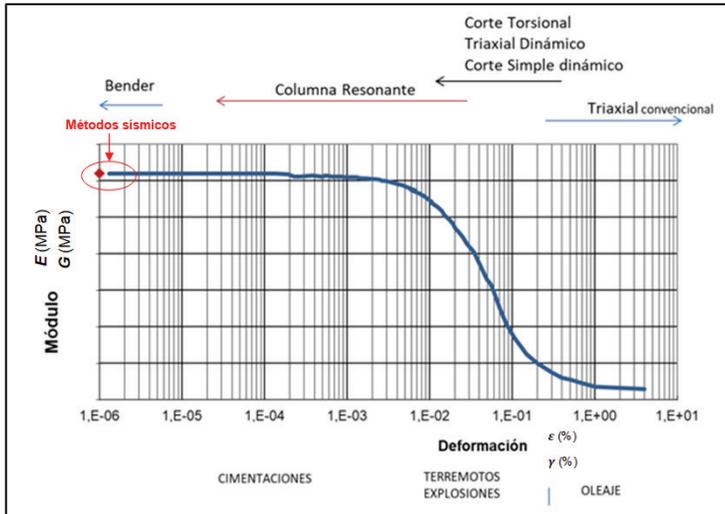
$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (2)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2} \quad (3)$$

### 3.2 – ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio para el estudio dinámico del terreno se realizan sobre muestras de suelo, que pueden ser tanto inalteradas como reconstruidas o remoldeadas. Los ensayos más habituales son: triaxial cíclico, corte directo simple cíclico y corte torsional cíclico, cuando se quiere someter a la muestra a grandes deformaciones; y el ensayo de columna resonante, elementos Bender o mediante pulsos ultrasónicos (Pundit), cuando se aplican deformaciones menores. En la Figura 5 se incluyen estos ensayos en función del rango de deformaciones aproximado que pueden inducir, junto con algunos fenómenos que producen efectos dinámicos también según el grado de deformación que pueden generar. Este tipo de gráfica (Figura 5) donde se representa la variación del módulo ( $G$  o  $E$  según los ensayos realizados) para un amplio rango de deformación se denomina comúnmente curva de degradación.

En general estos ensayos consisten en someter a una probeta de suelo a una sollicitación cíclica, generalmente de tipo sinusoidal, una vez reproducidas, en lo posible, las condiciones de presión y confinamiento a las que se encuentra el suelo *in situ*. En algunos casos se determinan directamente las propiedades dinámicas del suelo midiendo las deformaciones y tensiones inducidas en la probeta a medida que aumenta el número de ciclos de carga - descarga aplicados, para así deducir.



**Fig. 5** – Gráfica de variación del módulo ( $G$  o  $E$ ) en función de la deformación (curva de degradación). Se indican los rangos de deformación aproximados cubiertos por diferentes ensayos para la caracterización dinámica de los suelos, y ejemplos de posibles fenómenos dinámicos que generan dichas deformaciones.

## 4 – APLICACIÓN AL ESTUDIO DE RELAVES

### 4.1 – Origen del material estudiado

Los relaves estudiados en este trabajo provienen del depósito del yacimiento de Aguas Teñidas, ubicado en la provincia de Huelva (Andalucía, España), en el municipio de Almonaster la Real. Actualmente (año 2025), este yacimiento es operado por Sandfire MATSA, una subsidiaria de Sandfire Resources LTD.

Sandfire MATSA produce concentrados minerales de cobre, zinc y plomo en una planta que procesa más de 4,5 millones de toneladas de material por año, situada al norte de la Faja Pirítica Ibérica, y que se abastece del mineral de tres minas subterráneas: Aguas Teñidas y Magdalena en Almonaster la Real, y Sotiel en Calañas; todas en la provincia de Huelva.

Las minas son operaciones subterráneas que son rellenadas con pasta generada a partir de los relaves tras la extracción. Parte de este material en forma de pasta se envía al depósito de relaves, siendo aproximadamente 2,0 millones de toneladas de relaves en pasta la cantidad depositada anualmente en este depósito con un contenido de sólidos del 70% en masa, lo que significa una humedad del 43%.

Las operaciones en el depósito comenzaron en 2007 y se espera que finalicen en 2026.

### 4.2 – Descripción de ensayos realizados

#### 4.2.1 – Ensayos de campo

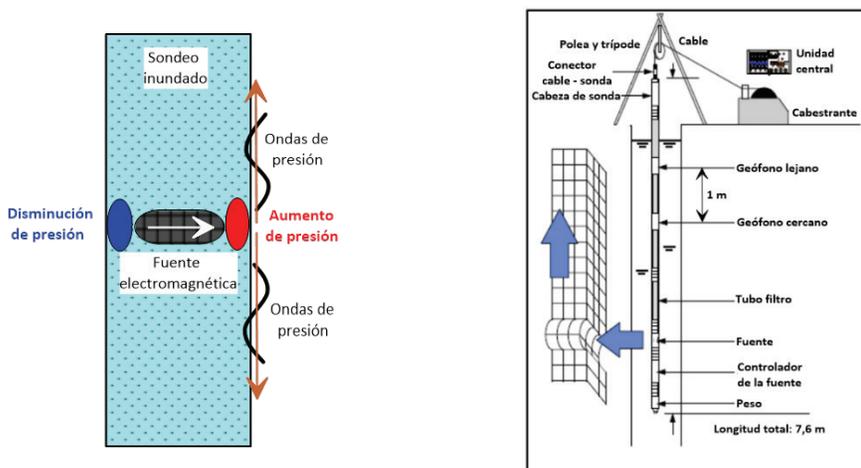
En el estudio que aquí se presenta se utilizó la técnica de registro con sonda PS (o *PS-Logging*), la cual se ha utilizado en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para el estudio de distintos tipos de suelos e incluso algunas rocas blandas. Este equipo está especialmente diseñado para el estudio de suelos blandos, de modo que se trata de una técnica ideal para la determinación de las velocidades de propagación de las ondas en un material como los relaves de los depósitos mineros. Además, en

comparación con otras técnicas sísmicas que pueden desarrollarse en el interior de sondeos, solo necesita un único sondeo para llevarse a cabo. Por el contrario, es un equipo muy sensible y por tanto se verá muy afectado por posibles ruidos generados por otras fuentes, por ello su aplicación e interpretación requiere de cierta experiencia.

#### 4.2.2 – Sonda de registro PS

La sonda de registro PS es un equipo de medida geofísico desarrollado para medir las velocidades de propagación de ondas mecánicas P y S ( $V_p$  y  $V_s$  respectivamente) en el entorno de las paredes de un sondeo (Telford, 1990). Estas ondas son generadas por el propio equipo a través de una fuente impulsiva. Para que se produzca una transferencia de esta perturbación desde el equipo a las paredes del sondeo, y por tanto al terreno, será necesario que este esté lleno de agua (o lodo) en el momento de realizar las medidas (Kitsunezaki, 1980). En función de las características de los materiales atravesados puede ser necesario entubar el sondeo para asegurar la estabilidad de las paredes. Si esto es necesario se deberá, para tener una buena transferencia de la señal al terreno, utilizar tubería de PVC y cementarla dejando el tiempo suficiente de fraguado para conseguir un buen contacto.

La fuente consiste en un pequeño martillo instalado en el interior de la sonda y que es accionado por la excitación de unos solenoides. Esta fuente genera una perturbación que se traduce en una variación en la presión del fluido del sondeo y que se transmite, en forma de onda de tubo, paralela a su eje (Figura 6, izquierda). Estas ondas son detectadas por una pareja de sensores separados 1 m e implementados en la propia sonda y registradas en una unidad central. Para el desplazamiento del dispositivo a lo largo del sondeo se dispone de un sistema de cabestrante con una polea (Figura 6, derecha).



**Fig. 6** – (Izquierda) Esquema del funcionamiento de la fuente para generar las ondas en las paredes del sondeo. (Derecha) Esquema de los componentes que forman el equipo de ensayo con sonda de registro PS.

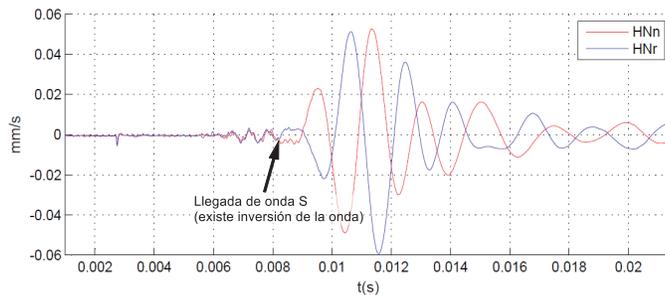
La fuente es capaz de generar tanto ondas P como S variando la dirección del golpeo. Las ondas S, que se transmiten más lentamente que las P y, por tanto, llegarán a los receptores más tarde tienen polaridad, propiedad que hace que el signo de su amplitud dependa del sentido de disparo (para una misma dirección de golpeo), invirtiéndose una respecto de la otra para cada uno de ellos. Este aspecto ayudará para su detección y es por ello por lo que en cada punto de medida se realizan dos

disparos, uno en el que el martillo golpea en un sentido y otro en el que el sentido de golpeo se invierte (Figura 7). Las ondas P son más fácilmente detectables ya que son las primeras que llegan a los receptores (Figura 8). Las velocidades se obtendrán por la diferencia de tiempos de llegada de las ondas a cada uno de los sensores (cuya separación es conocida e igual a 1 m). Estas velocidades serán las correspondientes al tramo de terreno de 1 m comprendido entre los sensores en el momento de la medida y, para la interpretación, se asignarán a la profundidad a la que se encuentre su punto medio. Respecto a  $V_s$  procede comentar que se obtienen dos valores, uno por cada sentido de disparo, siendo el valor medio el considerado como resultado final.

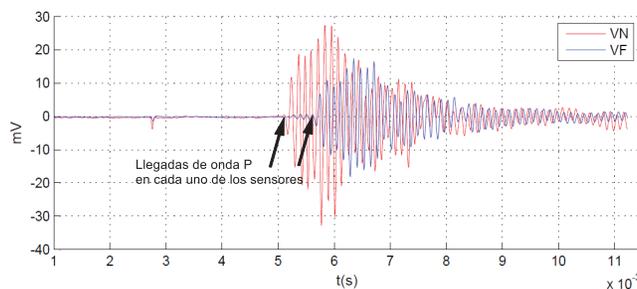
Se estima que la perturbación afecta y penetra radialmente en torno a 1 m en el terreno del entorno del sondeo.

A partir de las velocidades de onda obtenidas en este ensayo se podrán estimar distintos parámetros del terreno, como el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), el módulo de corte o rigidez transversal ( $G$ ) o el módulo de Young ( $E$ ), teniendo en cuenta las relaciones que aparecen en las ecuaciones (1), (2) y (3) anteriores y conocida o estimada también la densidad ( $\rho$ ).

Es importante tener en cuenta el siguiente aspecto en cuanto a los resultados obtenidos por esta técnica. Si bien pueden obtenerse velocidades de propagación  $V_p$  y  $V_s$ , originalmente este método fue ideado para determinar  $V_s$ , por lo que la fuente está diseñada para generar un campo donde las ondas S sean predominantes (Kitsunezaki, 1980). A pesar de ello, al incorporar sensores capaces de registrar ondas en direcciones tanto transversal como longitudinal, en muchas ocasiones también es posible detectar ondas P y obtener por tanto valores de  $V_p$ . Esto significa que los valores de  $V_p$  hay que considerarlos estimativos de los materiales afectados en el ensayo, siendo los valores de  $V_s$  más aptos a la hora de detectar cambios de material.



**Fig. 7** – Determinación del tiempo de llegada de las ondas S a uno de los receptores a partir de las señales registradas para los dos sentidos de golpeo de la fuente, sentido “normal” (HNn) y sentido “inverso” (HNr).



**Fig. 8** – Determinación de los tiempos de llegada de la onda P a cada uno de los receptores (receptor más cercano a la fuente, VN; y receptor más alejado de la fuente, VF).

### 4.2.3 – Ensayos de laboratorio

Para obtener una caracterización dinámica completa del material es necesario cubrir un amplio rango de deformaciones. Por tanto, se ejecutaron varios ensayos de laboratorio con el fin de estudiar el comportamiento dinámico del material para diferentes niveles de deformación.

Los ensayos realizados fueron: corte directo simple cíclico, columna resonante y elementos Bender instalados en una célula triaxial.

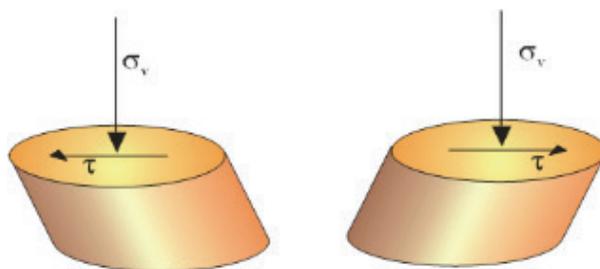
#### 4.2.3.1 – Corte directo simple cíclico

En el ensayo de corte directo simple cíclico (CDSC) se estudia la variación de la resistencia al corte de un determinado suelo cuando sobre él actúan esfuerzos cíclicos de corte. El rango de deformaciones que cubre es característico de eventos cíclicos como terremotos o explosiones (rango medio – alto, Figura 5). Por ello es especialmente útil para ensayos destinados al estudio de procesos de licuefacción, los cuales están normalizados en la norma ASTM D8296-19 (2019).

En el ensayo se trata de reproducir las condiciones de un suelo que se ve afectado por la propagación de ondas que generan sobre él esfuerzos de corte, mientras se encuentra en una situación de confinamiento lateral y consolidación vertical tales que se cumpla la condición de  $K_0$ , es decir, que sobre el terreno no existe estados de empuje activo ni pasivo. El confinamiento lateral se consigue introduciendo la probeta cilíndrica objeto de ensayo en una membrana indeformable lateralmente, mientras que la consolidación uniaxial se consigue aplicando carga vertical sobre la misma. La sollicitación de corte se genera estableciendo un movimiento relativo de la base de la probeta respecto de la parte superior con una tasa fija de desplazamiento o fuerza. Este movimiento de corte será posible gracias a la membrana que, aun siendo indeformable lateralmente, lo que quiere decir que su área transversal no varía, sí que permite este tipo de movimientos (Figura 9).

Durante el ensayo se registran las tensiones y deformaciones generadas o aplicadas sobre la probeta gracias a células de carga y transductores LVDT. A partir de estas medidas se representan los ciclos de histéresis para determinar el módulo de rigidez y el amortiguamiento en cada ciclo.

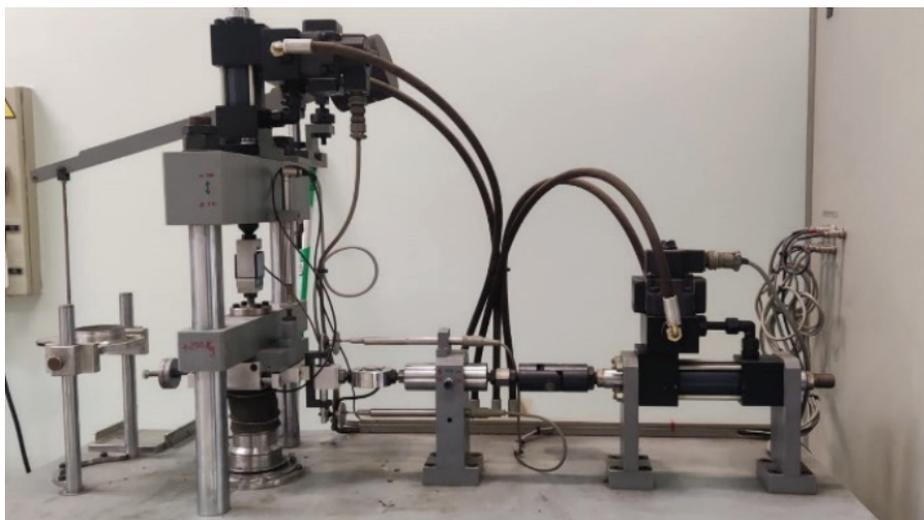
En la Figura 10 se muestra una fotografía del equipo de CDSC disponible en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX y con el cual se ejecutaron los ensayos.



**Fig. 9** – Tensiones y deformación que se produce durante el ensayo. Siendo  $\sigma_v$  la tensión vertical de consolidación y  $\tau$  la tensión de corte aplicada o generada durante el ensayo.

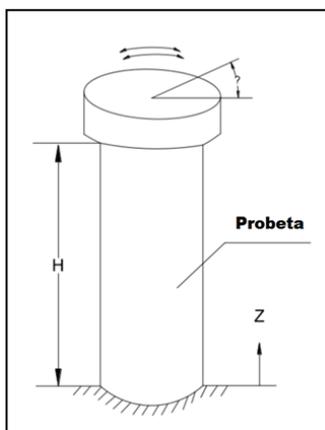
#### 4.2.3.2 – Columna resonante

El ensayo de columna resonante es uno de los métodos más utilizados en laboratorio para evaluar las propiedades dinámicas en probetas cilíndricas de suelo en los rangos de deformaciones angulares ( $\gamma$ ) bajas e intermedias (Kramer, 1996). El ensayo está normalizado en la norma ASTM D4015-15 (2000).



**Fig. 10** – Equipo de ensayos de corte directo simple cíclico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

El método consiste en someter una probeta cilíndrica de suelo a cargas armónicas torsionales por medio de un sistema electromagnético que permite variar la frecuencia de excitación, y determinar su frecuencia de resonancia. La probeta de suelo se recubre con una membrana impermeable y se introduce en una célula triaxial en la que se le aplicarán las presiones de confinamiento y de cola necesarias para el ensayo. La torsión se aplica sobre la parte superior de la muestra, quedando fija la parte inferior al pedestal de la base de la célula triaxial (Hardin y Drnevich (1972) (Figura 11).



**Fig. 11** – Esfuerzo torsional generado sobre la probeta durante el ensayo de columna resonante. La probeta está fijada en la base y el esfuerzo se aplica en la parte superior (Gordillo, 2011).

El sistema electromagnético posibilita variar tanto la frecuencia como el voltaje de entrada, es decir, la amplitud de la señal, por lo que se puede someter la muestra a diferentes esfuerzos torsionales y por tanto distintos niveles de deformación. La frecuencia de resonancia ( $f_r$ ) será aquella para la cual el sistema entra en resonancia y la deformación angular producida sobre la probeta es

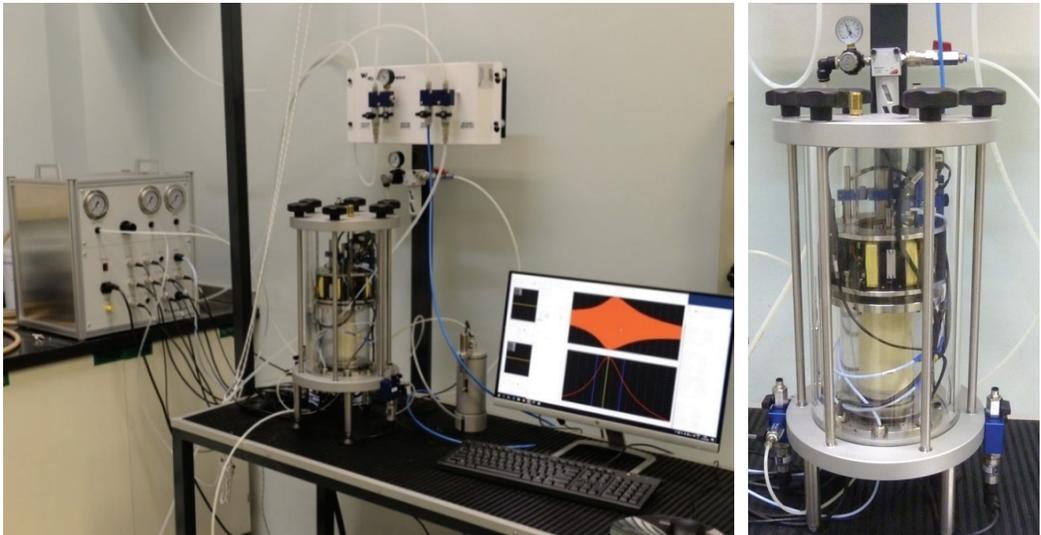
máxima. Conocida esta, la teoría de transmisión de ondas permite obtener la velocidad de propagación de las ondas S ( $V_s$ ) según la ecuación (4), donde “F” es una constante que relaciona los momentos de inercia de la probeta y del equipo de medida, y “L” es la longitud de la probeta (ASTM D4015–15, 2000; Muñoz, 2017).

$$V_s = \frac{2\pi f_r L}{F} \quad (4)$$

Mediante diferente instrumentación instalada en el equipo de ensayo puede medirse la deformación producida y el cambio de volumen experimentados por la probeta. A través de este último podrá determinarse la densidad en cada momento y, junto con los valores de  $V_s$ , obtener los valores del módulo de rigidez  $G$ .

También es posible obtener medidas del amortiguamiento mediante dos métodos. Por el método de decaimiento de vibración libre, mediante el cual se modeliza el decaimiento de la amplitud de vibración de la probeta por medio de un decremento logarítmico. O por el método del ancho de banda de media potencia, donde el decremento logarítmico se obtiene mediante la media de la anchura de la curva de respuesta cerca de la frecuencia de resonancia.

En la Figura 12 se muestra una fotografía del equipo para el ensayo de columna resonante disponible en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX y con el cual se ejecutaron los ensayos.



**Fig. 12** – (Izquierda) Fotografía del equipo de ensayos de columna resonante disponible en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. (Derecha) Fotografía de detalle de la célula donde se instala la probeta.

#### 4.2.3.3 – Elementos Bender

El ensayo con elementos Bender es el ensayo comúnmente utilizado para la determinación del módulo de rigidez ( $G$ ) para pequeñas deformaciones, y sus resultados generalmente están en consonancia con los obtenidos a partir de los ensayos de columna resonante (Braja y Zhe, 2016).

Las deformaciones no pueden medirse durante el ensayo, pero se considera que es el ensayo de laboratorio con el que se consigue aplicar los menores niveles de deformación.

El ensayo permite medir las velocidades de propagación de las ondas P y S en el interior de probetas de suelo. Existe norma ASTM, pero únicamente se hace referencia a la determinación de la velocidad de propagación de las ondas S (ASTM D8295 – 19, 2019).

Los elementos Bender son transductores basados en la piezoelectricidad. Este es un fenómeno físico presentado por determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, generan electricidad. El fenómeno es reversible, pues aplicando a las caras del cristal una tensión eléctrica, se produce una deformación mecánica proporcional al potencial eléctrico. Mediante el uso de esta propiedad se pueden generar ondas mecánicas poniendo en contacto estos elementos sobre una muestra de suelo, registrando al mismo tiempo ondas que viajen por ella. En la Figura 13 se incluye una fotografía de una pareja de elementos Bender y un esquema de funcionamiento.

El sistema de medida de este método está constituido por un emisor y un receptor situados en los extremos de una probeta de suelo. Suelen instalarse en células triaxiales o edométricas para someter a la muestra a las condiciones confinamiento que se quieran reproducir. Aplicando sobre el emisor una tensión eléctrica, se generan ondas internas, de tipo P o tipo S, que se propagan a través de la muestra de suelo. El elemento en el otro extremo de la probeta recibe la señal, lo que permite medir el tiempo empleado por la onda en recorrer la probeta. Conocida la altura de la probeta, se puede calcular las velocidades de propagación  $V_s$  y  $V_p$ . En la Figura 14 se muestra a la izquierda un esquema del sistema de medida con elementos Bender y a la derecha una fotografía de los elementos.

Además, como las deformaciones que se inducen son muy pequeñas las muestras no se ven alteradas y puede realizarse sobre ellas otros ensayos posteriormente.



**Fig. 13** – (Izquierda) Fotografía de los dispositivos que se instalan en cada uno de los extremos de la probeta y donde vienen insertados los elementos Bender. (Derecha) Esquema de funcionamiento del ensayo.

### 4.3 – Ensayos ejecutados

#### 4.3.1 – Ensayos de campo: sonda de registro PS

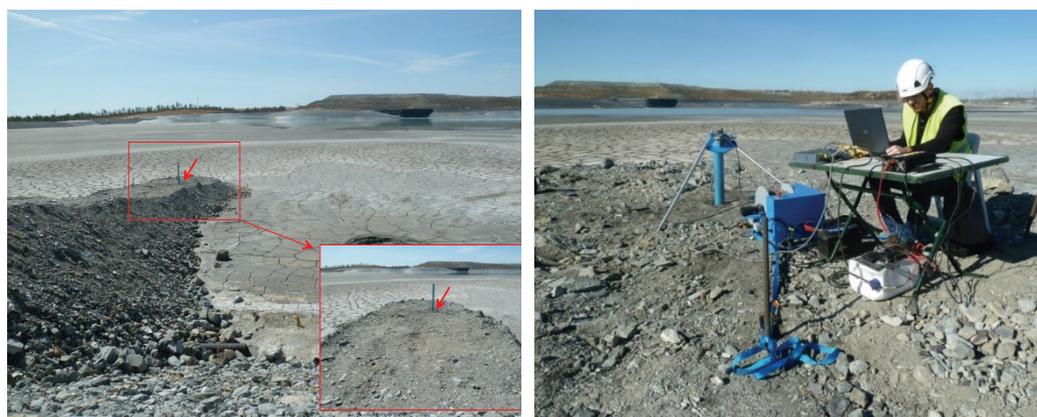
La campaña de ensayos de campo consistió en la toma de medidas con sonda de registro PS a lo largo de un sondeo mecánico que previamente se había realizado, y que se dejó accesible y preparado para la realización de este ensayo. El sondeo se encontraba entubado con tubería de PVC pero sin cementar, ya que debido a las propias características del material atravesado y el tiempo transcurrido hacían suponer que el material se había cerrado sobre la tubería propiciando un buen contacto, garantizando así una buena transmisión de las señales por las paredes del sondeo.

Tal y como puede verse en la Figura 14, el acceso al sondeo se encontraba sobre una plataforma construida sobre la superficie del depósito, y que fue utilizada para posicionar la máquina que ejecutó el sondeo mecánico. El origen de profundidades de las medidas se tomó en la boca del sondeo, por tanto, los primeros metros corresponden al material vertido para la construcción de dicha plataforma. En esta misma Figura 14 se incluye una fotografía tomada durante las medidas.

La longitud total del sondeo mecánico fue de 27,5 m y la toma de medidas se desarrolló en toda su longitud, teniendo en cuenta que las características constructivas de la sonda imposibilitan la medida en los primeros y últimos metros.

Inicialmente se tomaron medidas cada metro, de abajo a arriba, y una vez finalizadas se planteó un nuevo ensayo intercalando los nuevos puntos de medida entre los anteriores y cambiando algunos parámetros de adquisición para intentar afinar la futura interpretación y sus resultados. Por tanto, finalmente, se ejecutaron dos ensayos equiespaciando las medidas 1 m en ambos casos. La denominación y los intervalos de profundidades medidas en cada caso fueron:

- PSLogging 1: primer ensayo que comienza a una profundidad 23,5 m (profundidad de medida máxima posible), pasando posteriormente a 23 m y, desde aquí hasta 3 m, subiendo y parando la sonda para medir cada metro. Se añadió también la medida en 2,5 m (profundidad de medida mínima posible).
- PSLogging 2: segundo ensayo que se comenzó con medida en 22,5 m, y se terminó con una medida (repetida) en 2,5 m tomando medidas cada metro.



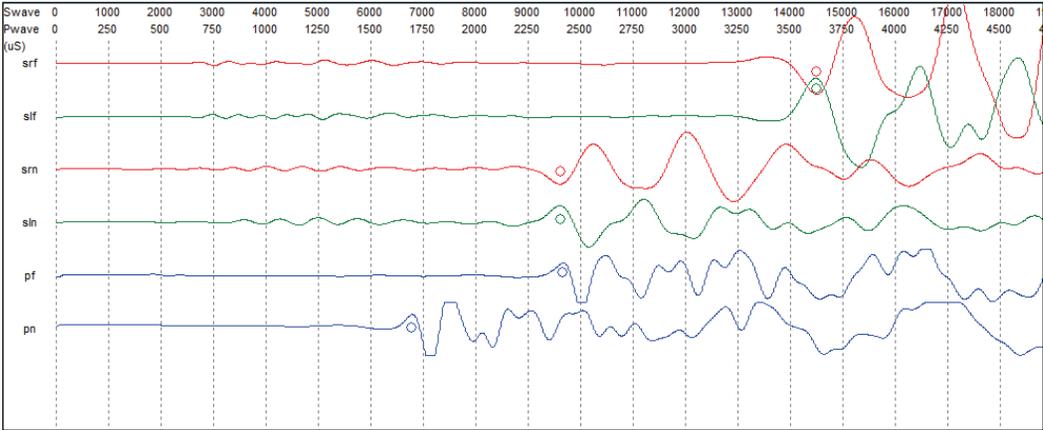
**Fig. 14** – (Izquierda) Emplazamiento del sondeo en el depósito sobre la plataforma construida para la realización del sondeo mecánico. Se indica la boca del sondeo, que se consideró como origen de profundidades para las medidas con sonda de registro PS. (Derecha) Fotografía tomada durante la toma de medidas.

Combinando ambos ensayos, se midieron un total de 44 puntos distribuidos entre 23,5 m y 2,5 m y separados 0,5 m entre sí.

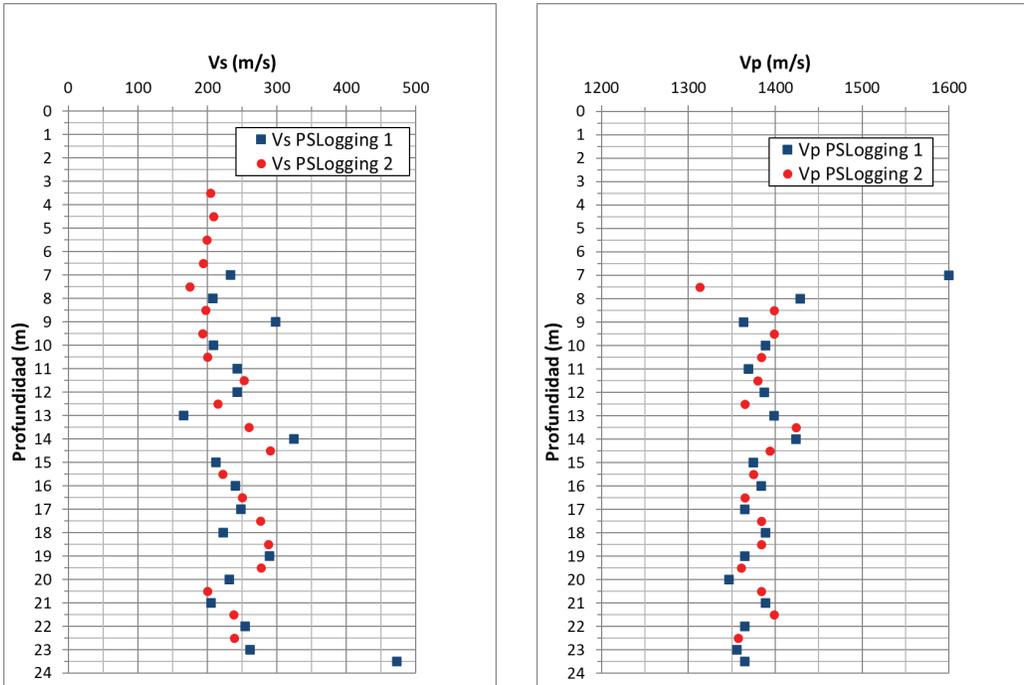
En la Figura 15 se muestra, a modo de ejemplo, los registros medidos, una vez acotados y filtrados, para una profundidad concreta del ensayo denominado PSLogging 1. Se miden las señales de ondas tipo S para cada sensor y para cada sentido de golpeo de la fuente (srf, slf, srn y sln en la Figura 15), y las señales de ondas tipo P también en ambos sensores (pf y pn en la Figura 15). Se incluye sobre los registros los tiempos interpretados en cada señal para el cálculo de las velocidades de propagación de ondas.

Como resultado de la interpretación de las medidas se obtienen las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  en función de la profundidad. Los valores de cada velocidad obtenidos en ambos ensayos se representaron en una misma gráfica. Estas gráficas se incluyen en la Figura 16.

Cabe recordar que el origen de profundidades para las medidas se fijó en la boca del sondeo, es decir, en la superficie de la plataforma (Figura 14).



**Fig. 15** – Señales analizadas en el ensayo PSLogging 1 para la profundidad de 21 m. Los registros en rojo corresponden a las ondas de tipo S medidos en cada sensor para un sentido de golpeo, en verde para el golpeo en sentido contrario y en azul las señales de ondas tipo P en cada sensor. Aparecen también representados, con puntos sobre las señales, los tiempos de llegada interpretados en cada registro para el cálculo de velocidades.



**Fig. 16** – Representación gráfica de los valores de velocidad,  $V_p$  y  $V_s$ , interpretados a partir de los ensayos con sonda de registro PS PSLogging 1 y PSLogging 2.

Respecto a los valores obtenidos cabe comentar los siguientes aspectos y aclaraciones:

- En el ensayo PSLogging 1, las señales registradas desde los 6 m hacia arriba no permitieron interpretar con seguridad los valores de velocidad. No obstante, tras modificar algunos

parámetros de medida para la ejecución del ensayo PSLogging 2, sí que se pudieron obtener esos valores para el caso de  $V_s$ . Por contra, no fue posible registrar una señal de onda P en el sensor lejano lo suficientemente clara como para obtener valores de esta velocidad en este rango de profundidades. Este hecho podría estar relacionado con un cambio en las características del material.

- A pesar de lo comentado en el punto anterior, para la profundidad de 2,5 m no se pudo obtener un valor de velocidad. Según la experiencia en otros trabajos, este hecho es relativamente habitual, ya que la onda generada por el sistema cuando la sonda está cerca de la superficie puede sufrir rebotes en la superficie libre del agua de la boca del sondeo, dando lugar a registros de señales difícilmente interpretables.
- Un aspecto que pudo perjudicar la calidad de las señales en los metros más superficiales es el mal acople que probablemente existiera entre el terreno vertido para la construcción de la plataforma y la tubería de revestimiento del sondeo. Esto puede generar vibraciones del tubo cuando se efectúan los disparos de la fuente para la toma de medidas a estas profundidades, las cuales pueden introducir ruido en las señales registradas.
- Como aspectos puntuales también cabe destacar los valores obtenidos en el ensayo PSLogging 1 para  $V_s$  a 23,5 m (473 m/s) y para  $V_p$  a 7 m (1600 m/s). Se trata de valores, en principio, discordantes con la tónica general de los resultados obtenidos. No se tuvo acceso al material recuperado en el sondeo mecánico para poder comprobar si, a esas profundidades, había algún cambio visible en sus características que pudieran explicar estos valores.

### 4.3.2 – Ensayos dinámicos de laboratorio

#### 4.3.2.1 – Ensayos previos de caracterización

Antes de platear y ejecutar los ensayos dinámicos de laboratorio se realizaron una serie de ensayos de caracterización de la muestra recibida. Se determinó el peso específico de partículas sólidas mediante picnómetro de Helio, la densidad máxima mediante compactación con Proctor normal y modificado, y análisis granulométrico por medio de tamizado y sedimentación.

En la Tabla 1 se recogen los resultados obtenidos de cada ensayo, y en la Figura 17 se muestra la curva obtenida tras la granulométrica completa.

**Tabla 1** – Ensayos previos de caracterización.

<b>Peso específico partículas sólidas</b>	4,110 g/cm <sup>3</sup>	
<b>Densidad máxima Proctor</b>	Proctor normal	Densidad seca máxima: 2,430 g/cm <sup>3</sup> Humedad óptima: 11,3%
	Proctor modificado	Densidad seca máxima: 2,520 g/cm <sup>3</sup> Humedad óptima: 7,9%
<b>Granulometría</b>	Arcilla (< 0,002 mm)	6,6%
	Limos (0,002 mm < x < 0,08 mm)	86,4%
	Arena (0,08 mm < x < 2 mm)	7,0%
	Gruesos (> 2 mm)	0%

#### 4.3.2.2 – Corte directo simple cíclico

Los ensayos de corte directo simple cíclico (CDSC) se realizaron sobre probetas fabricadas en el laboratorio a partir de una mezcla de material (residuo) seco y agua similar a la que se tiene *in situ* en el momento del vertido, esto es, tal y como se indicó en el apartado 4.1, con una proporción de masa sólida en peso en torno al 70 %. Esto significaba tener un material de partida muy fluido con el que fabricar una probeta con las dimensiones necesarias y en las condiciones de partida del ensayo impuestas. Una parte fundamental de este trabajo, que además supuso un reto, fue desarrollar una metodología para fabricar las probetas y poder montarlas en el equipo de ensayo.

Después de probar varios procedimientos, las probetas se fabricaron utilizando un molde edométrico recrecido en previsión de la pérdida de altura que podría causar por la consolidación del material de partida, y tener margen suficiente al acabar la consolidación para tallar la probeta con la altura necesaria para montar en el equipo de ensayo. Se vertía la mezcla en el molde y se instalaba en una prensa independiente al equipo de corte para llevar a cabo la consolidación, de manera lenta y hasta una tensión vertical algo inferior a la que se fijará en el ensayo (Figura 18). Después de esto se desmoldaba y se tallaba a las medidas necesarias para introducirla en la membrana impermeable (Figura 19). Por último, se instalaba en el equipo y se terminaba de consolidar a la tensión requerida antes de ejecutar el ensayo cíclico.

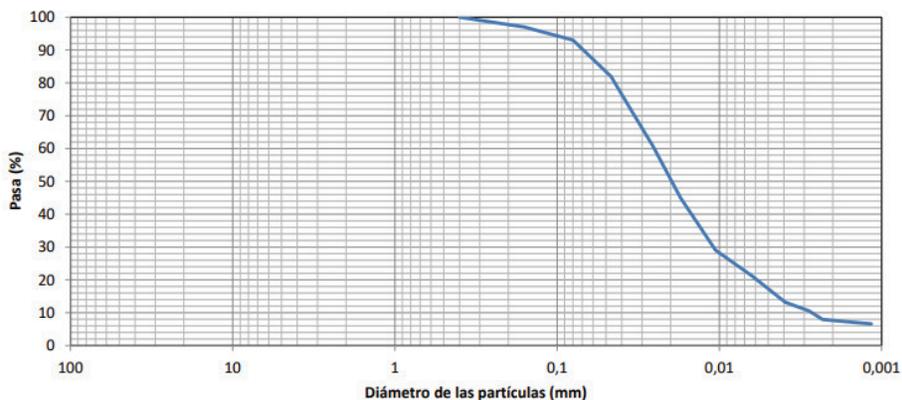


Fig. 17 – Curva granulométrica obtenida por tamizado y sedimentación.



Fig. 18 – (Izquierda) Vertido de la mezcla de material y agua en el molde edométrico recrecido. (Derecha) Consolidación estática en una prensa independiente al equipo de corte.

Se realizaron varios ensayos sobre probetas con una concentración de sólidos, en peso, del 70 % y del 64 %; y también sobre probetas fabricadas bajo las condiciones de Proctor modificado. Los ensayos se ejecutaron a volumen constante siguiendo la norma ASTM D8296-19.

Las tensiones verticales de consolidación fijadas fueron de 73, 146 y 292 kPa. Y las tensiones cíclicas de corte se definieron a partir de varios valores del parámetro CSR (*Cyclic Stress Ratio*), que se define como el cociente entre la tensión cíclica de corte y la tensión vertical aplicada, y siempre según una señal de tipo sinusoidal con frecuencia de 1 Hz. El ensayo cíclico se daba por finalizado cuando ocurría la pérdida prácticamente total de la tensión normal aplicada al inicio, lo que significa la licuefacción de la probeta, o cuando se superaran los 1000 ciclos aplicados sin que se produjera dicha pérdida total.



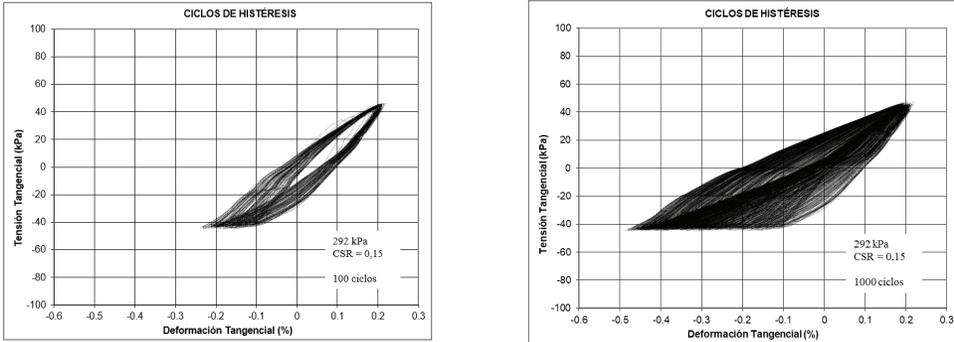
**Fig. 19** – Proceso de tallado de la probeta resultante tras la consolidación, e instalación dentro de la membrana impermeable sobre el pedestal para su montaje en el equipo de corte.

De entre todos los ensayos realizados, aquí se mostrarán algunos resultados de los ejecutados sobre las probetas fabricadas con las condiciones de Proctor modificado, consolidadas bajo una tensión de 292 kPa y ensayadas cíclicamente con un CSR de 0,25 y con CSR de 0,15.

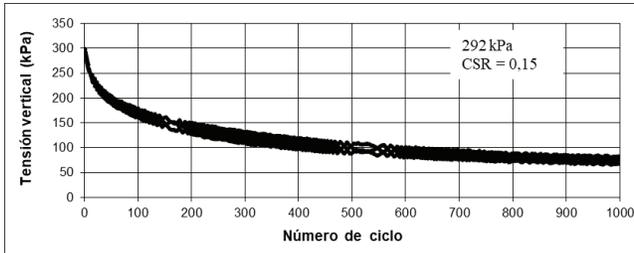
De cada ensayo se incluyen las gráficas de los ciclos de histéresis (relación entre la tensión y la deformación tangenciales), la variación de la tensión vertical con el número de ciclos y del módulo G y amortiguamiento en función de la deformación. La Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23, corresponden al ensayo con CSR de 0,15; y la Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27, corresponden al ensayo con CSR de 0,25.

Algunos comentarios que pueden hacerse a raíz de estos resultados son:

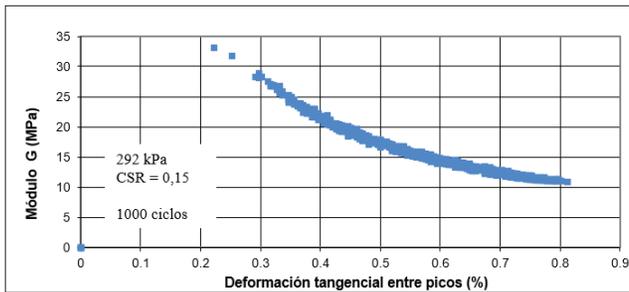
- En el ensayo con CSR = 0,15 se tiene pérdida parcial de tensión vertical, pero se superan los 1000 ciclos aplicados sin que llegue a perderse completamente. Por tanto, se considera que no se llega a la licuefacción de la probeta. En el ensayo con CSR = 0,25, donde la tensión tangencial aplicada en cada ciclo es mayor, sí que se llega a la licuefacción de la probeta, alcanzándose una deformación tangencial del 15 % (medida entre picos) en el ciclo 14.
- Tal y como se indica en la norma (ASTM D8296-19, 2019), a partir de la variación de la tensión vertical durante el ensayo cíclico a volumen constante se podría obtener la variación de la presión intersticial en un ensayo no drenado sobre muestra saturada. En concreto, la disminución de la tensión vertical experimentada sería equivalente al aumento de la presión intersticial.
- En el ensayo con CSR = 0,15 la deformación tangencial alcanzada es considerablemente menor, obteniéndose módulos de rigidez mayores, que en el ensayo con CSR = 0,25.



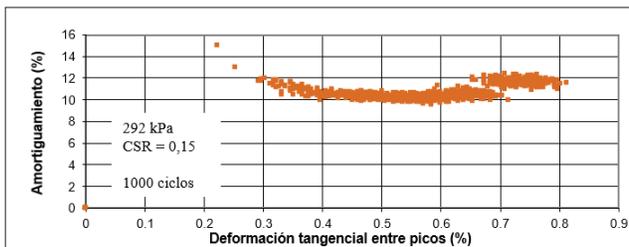
**Fig. 20** – (Izquierda) Representación de los 100 primeros ciclos de histéresis registrados en el ensayo con CSR = 0,15. (Derecha) Representación de los 1000 primeros ciclos de histéresis registrados en el ensayo con CSR = 0,15.



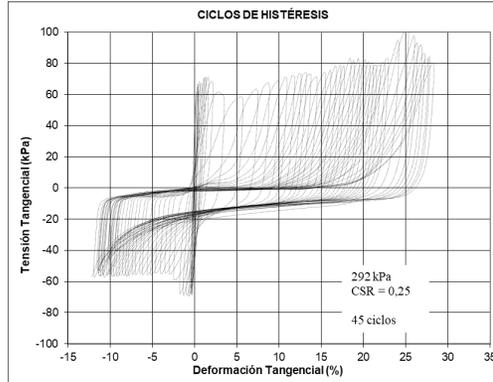
**Fig. 21** – Pérdida de tensión vertical con la aplicación de los sucesivos ciclos con CSR = 0,15.



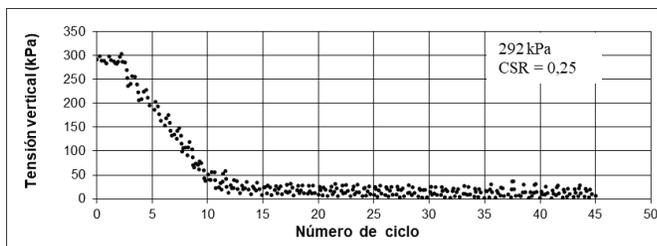
**Fig. 22** – Módulo G en función de la deformación obtenidos en el ensayo cíclico con CSR = 0,15.



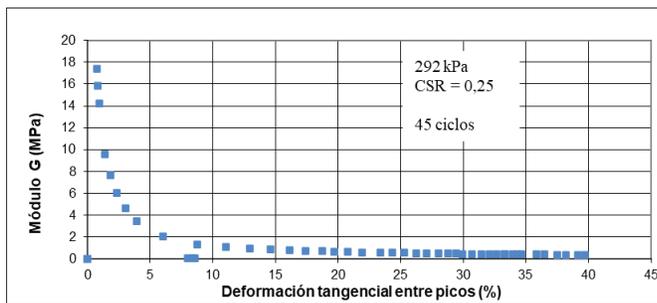
**Fig. 23** – Amortiguamiento en función de la deformación obtenidos en el ensayo cíclico con CSR = 0,15.



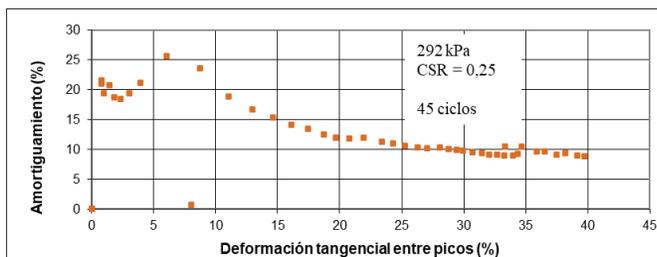
**Fig. 24** – Representación de los 45 primeros ciclos de histéresis registrados en el ensayo con CSR = 0,25.



**Fig. 25** – Pérdida de tensión vertical con la aplicación de los sucesivos ciclos con CSR = 0,25.



**Fig. 26** – Módulo G en función de la deformación obtenidos en el ensayo cíclico con CSR = 0,25.



**Fig. 27** – Amortiguamiento en función de la deformación obtenidos en el ensayo cíclico con CSR = 0,25.

#### 4.3.2.3 – Columna resonante

Se llevó a cabo un ensayo de columna resonante sobre una probeta compactada estáticamente hasta la densidad del Proctor modificado, y con una humedad del 14% para llegar a la saturación. Su fabricación se llevó a cabo de manera similar a lo expuesto en el apartado anterior, solo que en este caso se utilizó un molde, también recrecido en altura, de otras dimensiones para alcanzar el tamaño requerido de probeta. En la Figura 28 se muestra una fotografía del proceso de consolidación en la prensa, y de la probeta ya preparada para el ensayo.

Se aplicaron sucesivamente las mismas presiones efectivas: 73 kPa, 146 kPa y 292 kPa; con las que se realizaron los ensayos de CDSC. Para las dos primeras presiones de confinamiento, 73 kPa y 146 kPa, se obtuvieron únicamente las medidas correspondientes a la mínima deformación posible, con el objetivo de no alterar la probeta. A la presión de 292 kPa, se realizó un ensayo completo midiendo progresivamente la frecuencia de resonancia de la probeta desde las mínimas hasta las mayores deformaciones angulares posibles.

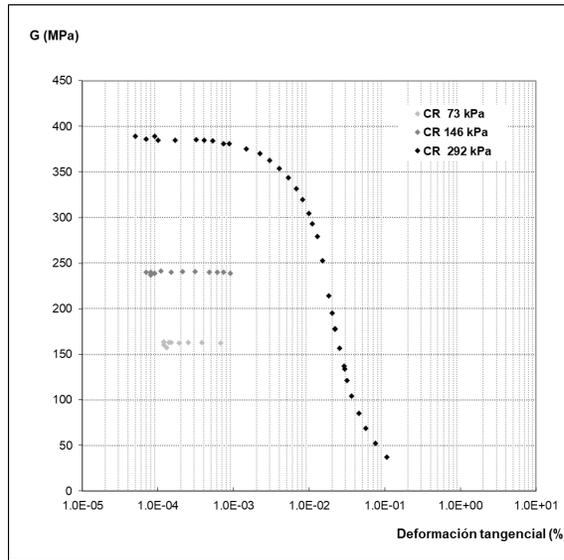


**Fig. 28** – (Izquierda) Consolidación de la mezcla material más agua en una prensa independiente. (Derecha) Probeta resultante lista para montar en el equipo de columna resonante.

En la Figura 29 se incluye los valores obtenidos del módulo de rigidez  $G$  en función de la deformación para las tres presiones efectivas configuradas.

Se pueden realizar los siguientes comentarios a partir de los resultados:

- Al aumentar la presión efectiva de confinamiento aumenta también el módulo de rigidez  $G$ , y las deformaciones que se consiguen aplicar sobre la probeta son cada vez menores.
- Todas las medidas bajo presiones de confinamiento de 73 y 146 kPa se efectuaron en el rango lineal de bajas deformaciones, pudiéndose considerar el valor de  $G$  constante en todo este rango. Esto también sucede en las medidas efectuadas a 292 kPa hasta deformaciones de  $10^{-3}$  %, a partir de las cuales comienza el comportamiento no lineal.
- El rango de deformaciones cubierto en el ensayo es muy amplio, obteniéndose gran parte de lo que se conoce como curva de degradación del módulo (variación del módulo con la deformación). Se recuerda que únicamente en las medidas con presión de confinamiento de 292 kPa se realizó el ensayo aumentando progresivamente la deformación aplicada hasta el máximo posible.



**Fig. 29** – Valores de módulo  $G$  obtenidos en el ensayo de columna resonante (CR) para las tres presiones efectivas de confinamiento (73, 146 y 292 kPa).

#### 4.3.2.4 – Elementos Bender en célula triaxial

Se realizaron ensayos con elementos Bender instalados en el interior de una célula triaxial para someter a la probeta a las condiciones de confinamiento desecadas. La probeta se fabricó mediante compactación estática hasta la densidad del Proctor modificado y con la humedad necesaria para su saturación, tal y como se realizó para los otros ensayos. En la Figura 30 se muestra la probeta fabricada tras el ensayo, y donde puede apreciarse la hendidura central debida a la hincada del elemento Bender necesaria para que se produzca una buena transmisión y recepción de las ondas.

Se tomaron medidas para la determinación de las velocidades de propagación de  $V_p$  y  $V_s$  bajo presiones de confinamiento similares a las configuradas en los otros ensayos, es decir, para 73, 146 y 292 kPa. Además, se tomó una medida inicial sin presión de confinamiento.

Tal y como se comentó en la introducción del ensayo, las medidas con elementos Bender es el método de laboratorio con el que se aplican las menores deformaciones posibles, y por tanto el método con el que pueden obtenerse los valores máximos del módulo  $G$ .

En la Tabla 2 se recopilan los valores de velocidad interpretados para las diferentes presiones de confinamiento, y en la Figura 31 se incluye la representación gráfica.

A raíz de los resultados puede comprobarse cómo a medida que se aumenta la presión de confinamiento, aumenta la velocidad de propagación de las ondas (y por tanto el módulo de rigidez  $G$ ).

## 5 – COMBINACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

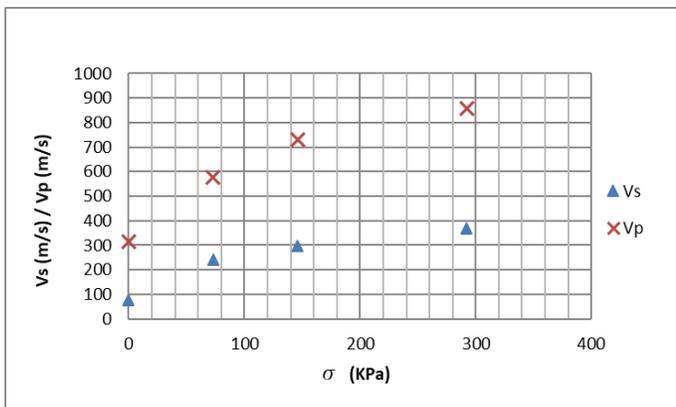
Una vez disponibles todos los resultados de las distintas técnicas de laboratorio, se representaron conjuntamente algunos de ellos para comprobar su ajuste y tener una visión en conjunto. En concreto los correspondientes al módulo  $G$  en función de la deformación aplicada. Esta representación se incluye en la Figura 32. A partir de ella se comprueba que:



**Fig. 30** – Probeta ensayada con elementos Bender. La hendidura central que se observa corresponde con el hincado del elemento Bender.

**Tabla 2** – Valores de velocidades de propagación  $V_s$  y  $V_p$  interpretadas a partir del ensayo con elementos Bender para las distintas presiones de confinamiento.

Presión efectiva de confinamiento (kPa)	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)
0	78	316
73	240	578
146	296	730
292	370	858



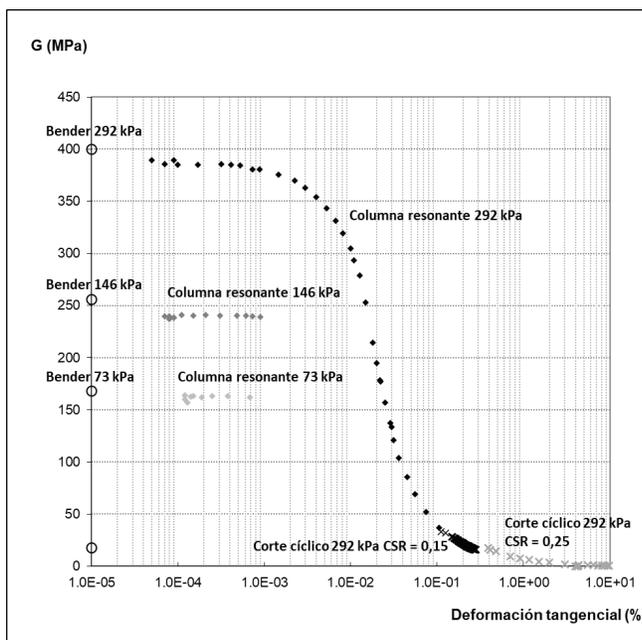
**Fig. 31** – Representación de las velocidades de propagación  $V_s$  y  $V_p$  interpretadas a partir del ensayo Bender en función de la presión de confinamiento.

- Los resultados obtenidos a partir de los ensayos con presión de confinamiento de 292 kPa son consistentes, formando una curva de degradación del módulo muy completa.
- Los valores obtenidos mediante elementos Bender para las dos presiones de confinamiento menores también están acorde con los obtenidos mediante columna resonante. Hay que

indicar que, aunque los valores del módulo interpretados mediante elementos Bender se han representado para una deformación de  $10^{-5}\%$ , este valor hay que considerarlo como aproximado ya que no puede medirse durante el ensayo, aunque sí que será del mismo rango o menor que la mínima alcanzada en la columna resonante.

Por otro lado, se compararon los resultados de velocidad de onda S ( $V_s$ ) de algunos de los ensayos de laboratorio con los obtenidos a partir de la sonda de registro PS. Teniendo en cuenta que las técnicas de campo producen sobre el terreno deformaciones muy bajas, solo podremos hacer esta comparación con los resultados procedentes de las técnicas de laboratorio en niveles de bajas deformaciones. Esto es, los correspondientes al ensayo con elementos Bender, y los valores iniciales del ensayo de columna resonante. De estos últimos se tomarán los valores de  $V_s$  en vez de los valores de  $G$  (que están directamente relacionados a través de la densidad). En cuanto a los valores de la sonda de registro PS, para efectuar la comparación se seleccionaron aquellos para una profundidad equivalente a las presiones de confinamiento configuradas en los ensayos de laboratorio. Todo ello aparece recopilado en la Tabla 3, a partir de la cual puede comentarse lo siguiente:

- Los valores de velocidad obtenidos mediante la sonda de registro PS son ligeramente inferiores a los obtenidos en laboratorio. Esto puede deberse a que el material se haya descomprimido tras la perforación del sondeo mecánico y tenga por tanto una densidad algo inferior a la del Proctor modificado considerada en los ensayos de laboratorio.
- Para explicar las pequeñas diferencias entre las medidas también hay que tener en cuenta que, si bien las deformaciones generadas en los ensayos con sonda de registro PS y elementos Bender son muy bajas, no son medibles ni controlables. En el ensayo de columna resonante, las deformaciones aplicadas pueden medirse y controlarse parcialmente y, teóricamente, estas serán algo mayores que en los otros ensayos. Por tanto, en los tres casos estamos analizando los valores para muy bajas deformaciones, pero no serán, en principio, exactamente las mismas.



**Fig. 32** – Representación conjunta de los valores del módulo  $G$  obtenidos por las diferentes técnicas de laboratorio en función de la deformación aplicada. Se indica la denominación del ensayo y la presión de confinamiento configurada.

**Tabla 3** – Comparación de los valores de velocidad  $V_s$  obtenidos con la técnica de campo de registro con sonda PS, y las técnicas de laboratorio de columna resonante y elementos Bender.

<b>Presión / Profundidad equivalente</b>	<b><math>V_s</math> Sonda registro PS</b>	<b><math>V_s</math> Columna resonante</b>	<b><math>V_s</math> Elementos Bender</b>
73 kPa / 3,5 m	210 m/s	237 m/s	240 m/s
146 kPa / 7,0 m	240 m/s	288 m/s	296 m/s
292 kPa / 14,0 m	325 m/s	366 m/s	370 m/s

## 6 – RESUMEN Y CONCLUSIONES

La caracterización dinámica de los suelos es esencial para el estudio de su comportamiento bajo sollicitaciones de tipo cíclico, ya sean de origen natural o generadas por la actividad del hombre. Este comportamiento depende del nivel de deformación al que se ven sometidos y puede estudiarse mediante técnicas de campo y de laboratorio. Es muy recomendable emplear varias metodologías para conseguir una caracterización completa y precisa.

En el trabajo que aquí se presenta se desarrollaron ensayos de campo y ensayos de laboratorio para el estudio de relaves procedentes del depósito de residuos del yacimiento de Aguas Teñidas (Huelva) operado por Sandfire MATSA.

La técnica de campo empleada fue la toma de medidas con sonda de registro PS en el interior de un sondeo. Esta técnica geofísica de tipo sísmico permite obtener los valores de velocidad de propagación de ondas P ( $V_p$ ) y ondas S ( $V_s$ ) del material próximo a las paredes del sondeo en función de la profundidad. Estas velocidades están directamente relacionadas con los módulos dinámicos. Además, las características de los relaves tal y como se encuentran en depósito de residuos, son ideales para la aplicación de esta técnica geofísica, ya que está especialmente diseñada para su aplicación en el estudio de suelos blandos.

En cuanto a los ensayos de laboratorio, se realizaron ensayos de corte directo simple cíclico, columna resonante y elementos Bender instalados en célula triaxial. Estas técnicas permiten obtener valores de los módulos dinámicos en rangos de deformación complementarios para, conjugando todos ellos, obtener una curva de degradación completa. Además, se configuraron varios valores de presión de confinamiento para realizar medidas en diferentes estados de consolidación. Los ensayos que aquí se presentan son los obtenidos a partir de probetas fabricas con unas mismas condiciones iniciales, en concreto con una densidad del Proctor modificado y con una humedad correspondiente a la saturación.

Una parte fundamental para el buen desarrollo de las pruebas de laboratorio fue idear un proceso de fabricación de probetas partiendo de un material muy fluido, como corresponde al estado en el que se vierten los relaves al depósito, consolidarlo hasta la presión requerida y obtener al final unas dimensiones de probeta que permitieran su tallado para instalarlas en el equipo de ensayo. Para ello se utilizaron moldes recreados en altura para verter el material y consolidar la muestra en una prensa independiente.

Debido a las características de los residuos, la técnica geofísica de registro con sonda PS es un ensayo de campo muy apropiado para su estudio *in situ*, además teniendo en cuenta que necesita un único sondeo para realizarse. Esta técnica proporcionó información de prácticamente todo el espesor de material presente en el depósito. Aunque no puede medirse la deformación aplicada durante el ensayo, estas son muy bajas, menores que cualquier técnica de laboratorio. Por tanto, la información obtenida corresponde a un rango de muy bajas deformaciones.

Las técnicas de laboratorio permitieron estimar los valores de los módulos dinámicos en un amplio rango de deformaciones. Con los elementos Bender se obtuvieron los valores máximos de los módulos, esto es, para las menores deformaciones posibles en laboratorio. Con el ensayo de

columna resonante pudieron obtenerse propiedades dinámicas para un mayor rango, desde bajas hasta medias – altas deformaciones. Y, finalmente, mediante el ensayo de corte directo simple cíclico, pudo completarse la caracterización dinámica obteniendo propiedades para altas deformaciones. Se conjugaron los resultados obtenidos por los diferentes ensayos y pudo comprobarse que los valores para el módulo de rigidez concuerdan entre sí, reforzando por tanto la utilidad y conveniencia de la ejecución de distintas técnicas para generar una curva de degradación del módulo completa.

También se compararon los resultados obtenidos mediante la técnica de campo y las técnicas de laboratorio. Se compararon los valores de velocidad  $V_s$  obtenidos en el ensayo con sonda de registro PS, los obtenidos a partir del ensayo de columna resonante para las mínimas deformaciones y los medidos con elementos Bender instalados en la célula triaxial. Se pudo comprobar que estos valores, aunque presentaban pequeñas diferencias, podían considerarse del mismo orden. Por tanto, la correspondencia entre el ensayo de campo y las técnicas de laboratorio puede considerarse satisfactoria.

Como conclusión general final puede indicarse que la utilización de diferentes técnicas para la caracterización dinámica es fundamental para analizar el comportamiento dinámico del material en un amplio rango de deformaciones. Además, este análisis puede ser una herramienta muy útil para analizar también la evolución de los módulos dinámicos del material con el paso del tiempo.

## 7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 4015-92 (1992, reapproved 2000). *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method*. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08.
- ASTM D 8295-19 (2019). *Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements*. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.09.
- ASTM D 8296-19 (2019). *Standard Test Method for Consolidated Undrained Cyclic Direct Simple Shear Test under Constant Volume with Load Control or Displacement Control*. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.09.
- Braja, M. Das; Zhe, L. (2016). *Principles of Soil Dynamics*. 3<sup>rd</sup> edition, Cengage Learning International Edition, USA.
- Galindo – Aires, R. A. (2013). *Degradación de suelos ante tensión de corte cíclica*. Lámpsakos, No. 10, pp. 43-51, Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia. <https://doi.org/10.21501/21454086.933>
- Gordillo, N. O. (2011). *Aplicaciones de la Dinámica de Suelos*. Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional de México, México D.F.
- Hardin, B. O.; Drnevich, V. P. (1972). *Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Div., ASCE, Vol. 98 No. SM6, June, pp 603-624. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001756>
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford University Press Inc, New York.
- Kakar, O. (2014). *Building a Framework for Predicting the Settlements of Shallow Foundations on Granular Soils Using Dynamically Measured Soil Properties*. M S Thesis, University of Texas at Austin, Austin.
- Kitsunezaki, C. (1980). *A new method of shear wave logging*. *Geophysics*, 45, pp. 1489-1506. <https://doi.org/10.1190/1.1441044>

- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Muñoz, A. J. (2017). *Manual de Laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos, con el uso de los equipos: triaxial cíclico, columna resonante y elementos piezoeléctricos Bender*. Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Saran, S. (2021). *Dynamics of Soils and Their Engineering Applications*. CRC Press, Boca Ratón, Florida.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Vucetic, M.; Dobry, R. (1991). *Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response*. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 117 (1), pp. 89-107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
- Wang, B. E. (2015). *Dynamic Properties of Fine Liquefiable Sand and Calcareous Sand from Resonant Column Testing*. M. S. Thesis, University of Texas at Austin, Austin.