# EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE GEOMATERIALES MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE TRES ENSAYOS AVANZADOS DE LABORATORIO

**Hernán PATIÑO[(1)], Fausto MOLINA-GÓMEZ[(1)*] y Rubén A. GALINDO-AIRES[(1)]**

[(1)] Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
*fausto.molina@upm.es

## RESUMEN

*La caracterización dinámica de geomateriales depende del nivel de deformación aplicado. Sin embargo, no todos los equipos de laboratorio cuentan con los instrumentos o métodos de ensayo que permiten evaluar el comportamiento dinámico desde las pequeñas hasta las grandes deformaciones, requiriendo la combinación de dos o más tipos de ensayo. Este estudio presenta una metodología para integrar los resultados de las curvas de degradación de rigidez obtenidas mediante tres métodos experimentales. El enfoque propuesto se basa en un amplio programa experimental que incluye ensayos de columna resonante, ensayos de corte simple cíclico y ensayos triaxiales cíclicos. Estos ensayos se realizaron bajo diferentes condiciones de deformación cíclica y de tensión de consolidación efectiva, con el objetivo de identificar las variables que permitan unificar el comportamiento de cada tipo de material en una ecuación predictiva común. Para validar este enfoque innovador, se ensayaron tres materiales procedentes de los estériles de las minas de Riotinto (Huelva, España). Los resultados de laboratorio demuestran que es posible capturar la tendencia de variación de la degradación de la rigidez del suelo en función de la deformación cíclica mediante varios tipos de ensayos.*

## ABSTRACT

*The dynamic characterization of geomaterials depends on the level of deformation applied. However, not all laboratory equipment includes the instruments or testing methods necessary to evaluate dynamic behavior from small to large deformations, requiring the combination of two or more types of tests. This study presents a methodology for integrating results from stiffness degradation curves obtained using three experimental methods. The proposed approach is based on a comprehensive experimental program comprising resonant column tests, cyclic single-shear tests, and cyclic triaxial tests. These tests were performed under different cyclic deformation and effective consolidation stress conditions, with the aim of identifying the variables that would allow the behaviour of each material type to be unified in a common predictive equation. To validate this innovative approach, three materials from the waste rock of the Riotinto mines (Huelva, Spain) were tested. Laboratory results demonstrate that it is possible to capture the trend of soil stiffness degradation as a function of cyclic deformation by different testign methods.*

**PALABRAS CLAVE (KEYWORDS)**: *Ensayos de laboratorio (laboratory testing), Dinámica de suelos (soil dynamics), Módulo de corte (shear modulus).*

# 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que caracterizan el comportamiento dinámico de los suelos es el módulo de rigidez cortante (G). Según Hardin y Drnevich (1972a, 1972b), Krizek et al. (1974), Kuribayashi et al. (1974) y Kuribayashi et al. (1975), el módulo de rigidez cortante depende del nivel de deformación cíclica, la tensión efectiva de consolidación, la consolidación secundaria, el índice de plasticidad, el índice de huecos, la amplitud de vibración, la historia de tensiones, la relación de tensiones cíclicas, el grado de saturación, la distribución granulométrica, la estructura del suelo, la frecuencia de vibración y el tipo de onda.

A niveles de pequeña deformación, la respuesta del material es prácticamente elástica lineal, por lo que el módulo de corte o rigidez mantiene un valor prácticamente constante, igual a su valor máximo (Gmax). Sin embargo, bajo deformaciones significativas, el suelo experimenta una degradación progresiva de sus propiedades mecánicas, lo que conduce a la acumulación de presiones intersticiales o a deformaciones permanentes, según las condiciones de drenaje (Lo Presti et al., 1997; Ciancimino et al., 2020).

En particular, estudios previos han evaluado la degradación de rigidez utilizando uno o dos procedimientos experimentales en un mismo equipo, tales como columna resonante y corte torsional cíclico (Alarcón-Guzman et al., 1989; Lo Presti et al., 1997; Ciancimino et al., 2023), columna resonante y elementos bender (Hoyos et al., 2015; Molina-Gómez et al., 2023), o triaxial cíclico y elementos bender (Rios et al., 2021). En algunos casos, se han combinado dos técnicas experimentales de distintos equipos para complementar los niveles de deformación alcanzables por cada procedimiento (Molina-Gómez et al., 2020; Noh et al., 2023; Shirkavand y Fakharian, 2023). Sin embargo, la combinación de resultados de más de dos equipos es una práctica menos habitual.

El presente estudio integra, de manera novedosa, resultados obtenidos mediante ensayos de columna resonante, triaxial cíclico y de corte simple cíclico, con el objetivo de evaluar de forma integral las curvas de degradación del módulo de corte. La principal innovación radica en la propuesta de una metodología experimental que combina resultados obtenidos mediante diferentes técnicas, validada mediante el análisis de tres materiales no plásticos procedentes de estériles mineros de las minas de Riotinto, en el sur de España. Los resultados obtenidos a partir de estos tres equipos de ensayo se ajustaron mediante un conjunto de curvas modelo, lo que permitió caracterizar la degradación de la rigidez en función de diferentes niveles de tensión efectiva de consolidación. Esta metodología representa un avance significativo en la caracterización de las curvas de degradación de rigidez en un amplio rango de deformaciones, aportando nuevos conocimientos sobre el comportamiento dinámico de los suelos bajo varias condiciones de carga. Asimismo, contribuye a mejorar el análisis y la seguridad de balsas estériles ubicadas en zonas con riesgo sísmico, así como al desarrollo de la ingeniería geotécnica y minera.

# 2. MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1. ESTÉRILES MINEROS DE RIOTINTO

Las muestras utilizadas en esta investigación proceden de depósitos de estériles de las minas de Riotinto, situadas en la zona centro-este de la provincia de Huelva (España), como se muestra en la Figura 1. Las minas de Riotinto constituyen uno de los yacimientos más importantes de España en cuanto a concentración de oro, cobre y plata. Este hecho ha condicionado la ocupación humana de la región desde tiempos remotos, y existen evidencias de asentamientos desde aproximadamente el año 2000 a.C.

La explotación minera ha generado, en una superficie aproximada de 1.200 hectáreas, un elevado número de escombreras y balsas de estériles que, en su estado actual, presentan un notable interés geotécnico, especialmente en lo relativo al comportamiento dinámico de las presas construidas con estos materiales.

Las muestras utilizadas se obtuvieron superficialmente. Los tres materiales analizados en este estudio se identifican en la mina como: “arena Cerro Salomón” (CSS), “lodos de alta densidad” (HDS) y “lamas de cobre” (CL). Las propiedades índices de estos materiales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de los estériles mineros de Riotinto.

| Material | Contenido de finos (%) | Límite Líquido (%) | Límite plástico (%) | Índice de plasticidad (%) | Gravedad específica | Densidad seca (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CSS | 32.7 | No presentó | No presentó | No presentó | 3.02 | 1.60 |
| HDS | 48.5 | No presentó | No presentó | No presentó | 2.99 | 1.65 |
| CL | 85.9 | 26.9 | 19.9 | 7 | 2.83 | 1.65 |

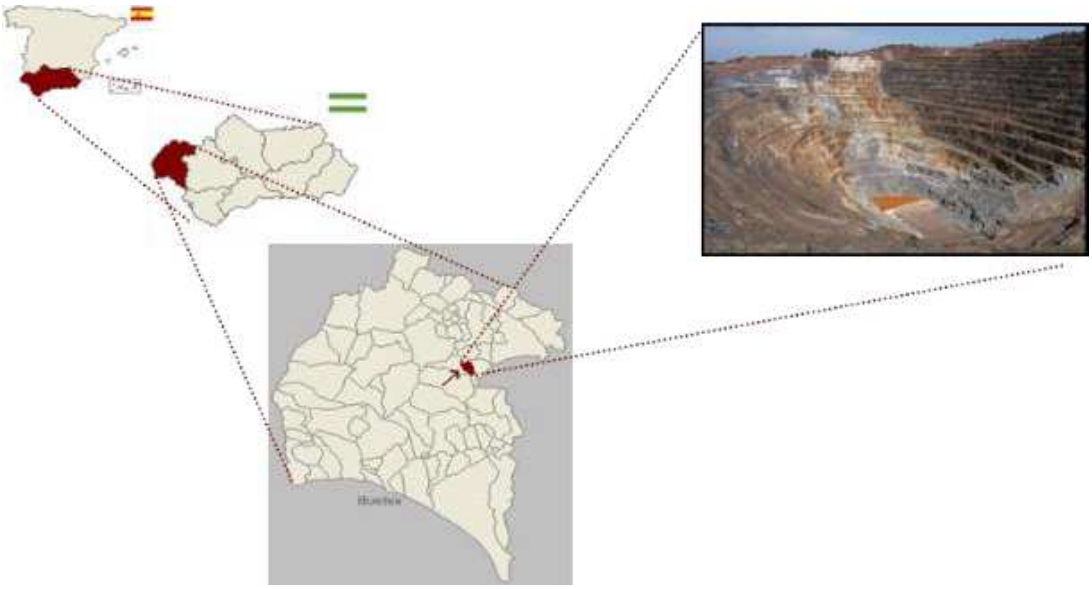


Figura 1. Localización geográfica de las minas de Riotinto de donde se extrajeron las muestras de estériles.

## 2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DINÁMICOS UTILIZADOS

Actualmente no existe un equipo comercial que permita estudiar el comportamiento dinámico de los suelos en un amplio rango de deformaciones cíclicas. Por ello, para alcanzar los objetivos de esta investigación fue necesario emplear los tres tipos de equipos que se describen a continuación.

### 2.1.1. COLUMNA RESONANTE

El equipo de columna resonante consiste en un sistema de oscilación forzada con un único grado de libertad torsional, que hace vibrar la probeta en un rango de frecuencias en el que puede identificarse su primer modo natural. En esta investigación, la probeta se mantuvo fija en su base y libre para vibrar en su extremo superior (ver Figura 2).

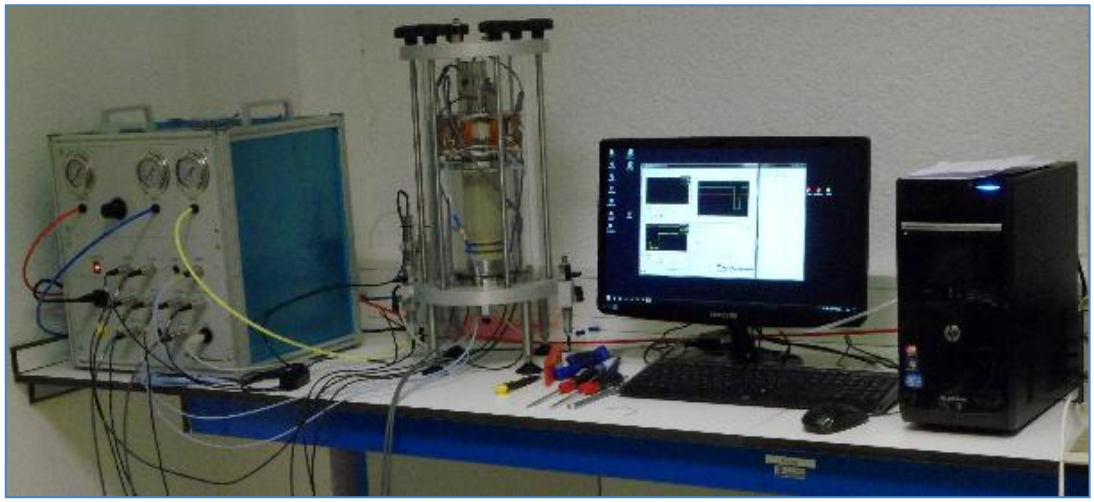


Figura 2. Equipo de columna resonante de la UPM.

Este equipo automatizado e instrumentado combina funciones de columna resonante y de corte torsional. No es necesario utilizar un osciloscopio ni un generador de funciones, ya que ambos están integrados en el software del equipo. La estructura flotante interna del sistema de excitación permite realizar ensayos en los que las probetas pueden experimentar grandes deformaciones axiales durante la fase de consolidación. Esta configuración permite visualizar en tiempo real la respuesta de los sensores durante el ensayo.

El equipo está constituido por:

- Dos celdas cilíndricas de policarbonato, una interna y otra externa. La celda interna permite aplicar la tensión de consolidación mediante un fluido presurizado, manteniendo los componentes electrónicos fuera del fluido. La celda externa ejerce la presión de confinamiento mediante un sistema neumático. Incluye, además, una base inferior que permite la aplicación de contrapresión y el drenaje.
- Una cabeza corrugada que transmite las fuerzas torsionales a la probeta y no permite el drenaje.
- Un sistema de accionamiento formado por ocho bobinas y cuatro imanes para aplicar la carga torsional.
- Un acelerómetro acoplado al sistema de excitación para medir la respuesta dinámica y calcular la velocidad de propagación de ondas de corte.
- Un LVDT para medir deformaciones axiales (recorrido de ±12.5 mm y precisión del 0.2%) y dos transductores de proximidad para medir deformaciones de corte.
- Tres transductores de presión para medir la presión de celda, la contrapresión y la presión intersticial, así como un sensor para medir los cambios volumétricos durante la consolidación.
- Una unidad de control con un sistema de adquisición de datos.
- Un ordenador para el control del equipo y el registro de datos.

Se realizaron un total de 108 determinaciones de frecuencia de resonancia, a partir de las cuales se obtuvieron las velocidades de propagación de las ondas de corte. El módulo de corte se calculó a partir de vibraciones torsionales y de la densidad del material. Las condiciones de ensayo se resumen en la Tabla 4.

Tabla 2. Condiciones de los ensayos de columna resonante.

| **Presión de cámara $\sigma_c$ (kPa)** | **Presión de cola $B_p$ (kPa)** | **Tensión efectiva de confinamiento $\sigma'_c$ (kPa)** | **Excitaciones torsionales $T_e$ (V)** |
|---|---|---|---|
| 450 | 400 | 50 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |
| 500 | 400 | 100 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |
| 550 | 400 | 150 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |
| 600 | 400 | 200 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |
| 650 | 400 | 200 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |
| 700 | 400 | 300 | 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 |

## 2.1.2. CORTE SIMPLE CÍCLICO

El equipo de corte simple cíclico utilizado en esta investigación dispone de un doble control servo (Figura 3), lo que permite aplicar cargas axiales y de corte de forma independiente. El sistema funciona mediante accionamiento neumático con una presión máxima de 800 kPa. El equipo permite realizar ensayos no drenados (a volumen constante) o drenados (a carga axial constante). El confinamiento se proporciona mediante un conjunto de anillos apilados de baja fricción, que garantizan un diámetro constante durante el ensayo.

Los principales componentes del equipo son: dos actuadores que aplican cargas axiales y de corte con capacidad de 75 kN, controlados por válvulas servodigitales con frecuencias de hasta 70 Hz; dos células de carga de 5 kN de capacidad y precisión de 1.2 N; tres sensores LVDT para medir deformaciones axiales y de corte; un sistema de control y adquisición de datos conectado a un ordenador mediante USB, con múltiples canales de entrada y alta resolución; y un software de control que permite definir el tipo de onda, la amplitud y la frecuencia, y registrar simultáneamente las variables medidas.

Se realizaron 27 ensayos en condiciones no drenadas (volumen constante). Siguiendo el enfoque de Finn y Vaid (1977), la presión de poros se evaluó a partir de las variaciones de la tensión vertical necesarias para

mantener constante la altura de la probeta. Las probetas tenían dimensiones H = 19 mm y D = 70 mm, y se aplicó una onda sinusoidal con un periodo de 0.5 s. Se establecieron cuatro criterios automáticos de finalización del ensayo: (i) relación de presión de poros, $u/\sigma'_{ov} \geq 95\%$; (ii) deformación cíclica, $\gamma_c \geq 14\%$; (iii) deformación permanente, $\gamma_p \geq 14\%$; y (iv) número de ciclos, $N = 1300$. Las condiciones de los ensayos de corte simple cíclico se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de los ensayos de corte simple cíclico.

| Material | $\sigma'_{ov}$ (kPa) | $\tau_c/\sigma'_{ov}$ (%) | $\tau_c$ (kPa) |
|---|---|---|---|
| CSS | 50 | 5, 10, 15 | 2.5, 5.0, 7.5 |
| | 100 | 5, 10, 15 | 5, 10, 15 |
| | 150 | 5, 10, 15 | 7.5, 15, 22.5 |
| HDS | 50 | 5,10, 15 | 2.5, 5.0, 7.5 |
| | 100 | 5, 10, 15 | 5, 10, 15 |
| | 150 | 5, 10, 15 | 7.5, 15, 22.5 |
| CL | 50 | 10, 20,30 | 5, 10, 15 |
| | 100 | 10, 20, 30 | 10, 20, 30 |
| | 150 | 10, 20, 30 | 15, 30, 45 |

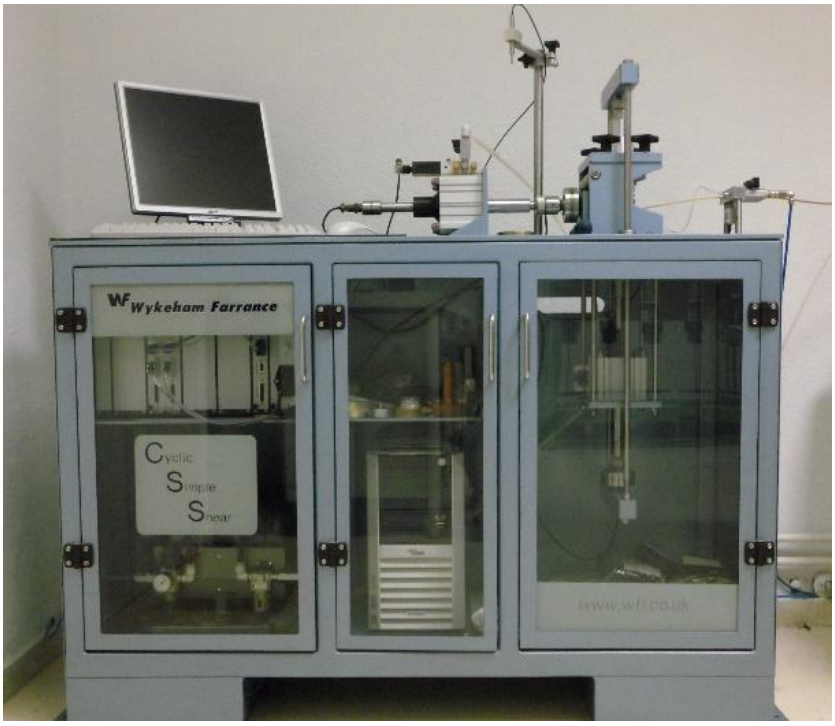



Figura 3. Equipo de corte simple cíclico de la UPM.

## 2.1.3. TRIAXIAL CÍCLICO

El equipo triaxial cíclico utilizado (Figura 4), fabricado por Wykeham Farrance, es un sistema neumático de doble control servo que permite aplicar tanto una carga axial cíclica como una presión de confinamiento dinámica, a diferencia de los equipos triaxiales convencionales. Sus principales componentes son: un bastidor con capacidad de carga axial de 50 kN; un actuador neumático de doble efecto con capacidad de ±5 kN; una célula triaxial; tres válvulas servo para controlar la carga axial, la presión de la celda y la contrapresión; un LVDT para la deformación axial; tres transductores de presión para medir la presión de celda, la contrapresión y la presión intersticial; una célula de carga sumergible; un sistema para medir los cambios volumétricos durante la consolidación; y un sistema de control y adquisición de datos conectado a un ordenador.



Figura 4. Equipo triaxial cíclico de la UPM.

Se realizaron 29 ensayos triaxiales cíclicos en condiciones no drenadas, midiendo la presión de poros bajo diferentes tensiones de consolidación y esfuerzos cíclicos en probetas de 50 mm de diámetro y de 100 a 110 mm de altura. Se aplicó una carga sinusoidal con un periodo de 0.5 s. El esfuerzo cíclico se definió como el porcentaje de la tensión efectiva de consolidación. Se establecieron los mismos criterios de finalización que en los ensayos de corte simple. Las condiciones de los ensayos triaxiales cíclicos se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de los ensayos de triaxial cíclico.

| **Material** | **$\sigma_c$ (kPa)** | **$B_p$ (kPa)** | **$\sigma'_c$ (kPa)** | **$\sigma_{cv}/\sigma'_c$ (%)** | **$\sigma_{cv}$ (kPa)** |
|---|---|---|---|---|---|
| CSS | 450 | 400 | 50 | 5, 10, 15 | 2.5, 5.0, 7.5 |
| | 500 | 400 | 100 | 5, 10, 15 | 5, 10, 15 |
| | 550 | 400 | 150 | 5, 10, 15 | 7.5, 15, 22.5 |
| HDS | 450 | 400 | 50 | 5, 10, 15 | 2.5, 5.0, 7.5 |
| | 500 | 400 | 100 | 5, 10, 15 | 5, 10, 15 |
| | 550 | 400 | 150 | 5, 10, 15 | 7.5, 15, 22.5 |
| CL | 450 | 400 | 50 | 10, 20, 30 | 5, 10, 15 |
| | 500 | 400 | 100 | 10, 20, 30 | 10, 20, 30 |
| | 550 | 400 | 150 | 10, 20, 30 | 15, 30, 45 |

## 2.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras fueron preparadas mediante el método de compactación en húmedo. Este procedimiento incluyó la reconstitución de muestras en el laboratorio con densidades secas representativas de las zonas de muestreo (Tabla 5). La compactación incluyó una humedad inicial de 5% para asegurar la estabilidad de las muestras durante su montaje. No obstante, dependiendo del tipo de ensayo, se implementó la compactación en un número diferente de capas con base en el tamaño de las muestras: para los ensayos de columna resonante y triaxial cíclico se utilizaron 6 capas (dimensiones de 50 de diámetro y entre 101 y 109 mm de altura.), mientras que para los ensayos de corte simple se utilizaron 3 capas (con altura de 19 mm y un diámetro de 70 mm).

Tabla 5. Densidades secas de preparación de las muestras según el tipo de relave.

| Material | $\rho_d$ (g/cm$^3$) |
|---|---|
| CSS | 1.60 |
| HDS | 1.65 |
| CL | 1.65 |

## 3. RESULTADOS

Los resultados de la Figura 5 muestran las curvas de módulo de corte para distintas tensiones efectivas de confinamiento, destacando su influencia en la variación del módulo de corte (*G*) en función de la deformación de corte (γ). Para cada nivel de tensión efectiva de consolidación y para los tres materiales ensayados, se realizaron determinaciones con seis niveles de excitación torsional: 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 y 0.8 voltios. Los valores de la velocidad de propagación de ondas de corte (*Vs*) se obtuvieron mediante la función implícita propuesta por Hardin (1965), calculada a partir de la frecuencia de resonancia, el momento polar de inercia del sistema de excitación respecto al eje de simetría, el momento polar de inercia de la muestra, la altura de la probeta y el módulo de corte. Este procedimiento se basa en la teoría de la vibración torsional de una barra y establece una relación entre G, la densidad del material (ρ) y *Vs*.

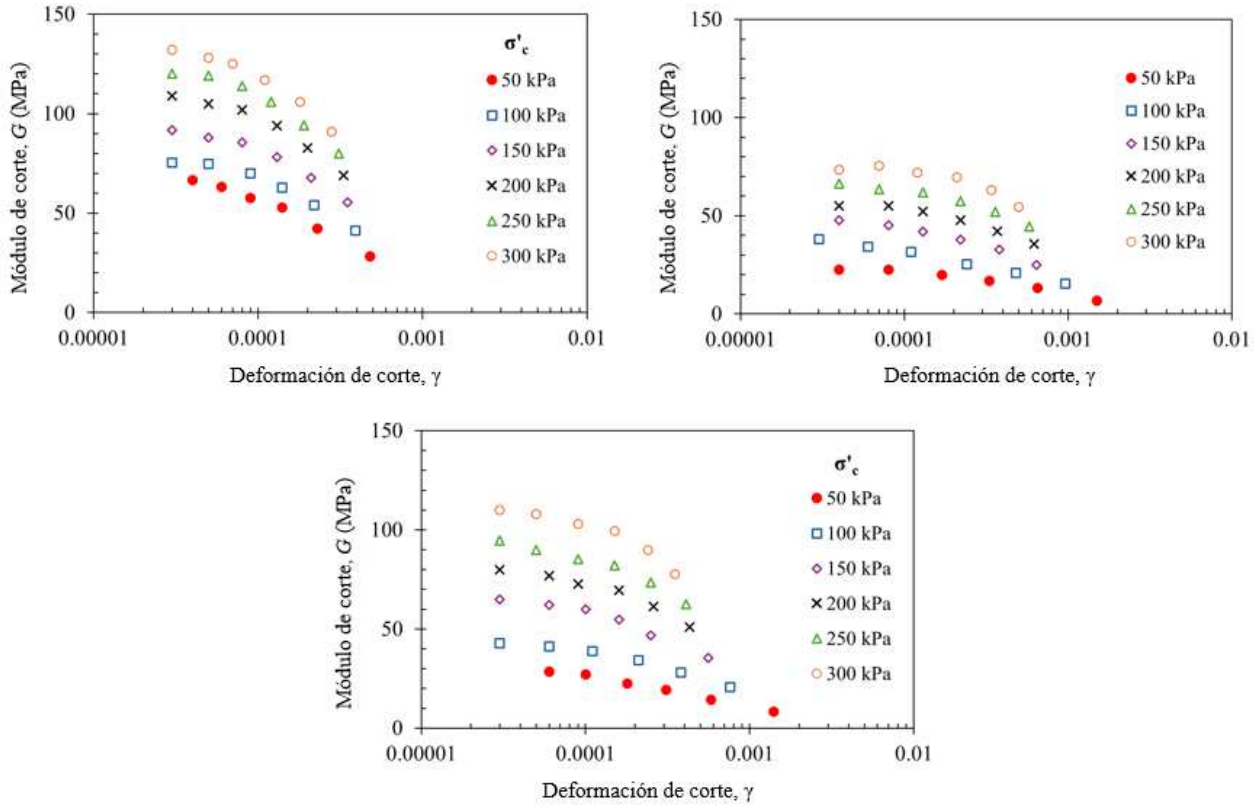



Figura 5. Variación de *G* en los ensayos de columna resonante en función de γ, para varios valores de σ'$_c$: a) CL; b) CSS; c) HDS.

Los resultados experimentales representados en la Figura 5 indican que, independientemente del tipo de material, σ'$_c$ ejerce una influencia muy significativa en la degradación de *G*, incluso mayor que la propia deformación γ. Asimismo, para un mismo nivel de deformación, *G* disminuye notablemente al reducirse la tensión efectiva de consolidación. El contenido de finos (<80 μm), aunque no sean plásticos, influye significativamente en el módulo de corte. Esto se observa al comparar los materiales CSS y HDS, que tienen el mismo origen, pero distinto contenido de finos: para una misma deformación y tensión efectiva, el módulo de corte del material HDS es aproximadamente el doble que el del CSS.

Cuando se realizan ensayos de corte simple cíclico y triaxial cíclico a los mismos niveles de tensión efectiva de consolidación ($\sigma'_{0v}$ o $\sigma'_c$) y a las mismas relaciones de tensión cíclica ($\tau_c/\sigma'_{0v}$ o $\sigma_{cv}/\sigma'_c$), los rangos de deformación cíclica ($\gamma c$) presentan magnitudes comparables o incluso se solapan. Los resultados de los ensayos de corte simple y triaxiales se presentan conjuntamente en la Figura 6, donde se han trazado líneas de tendencia preliminares en función de la tensión efectiva de consolidación.

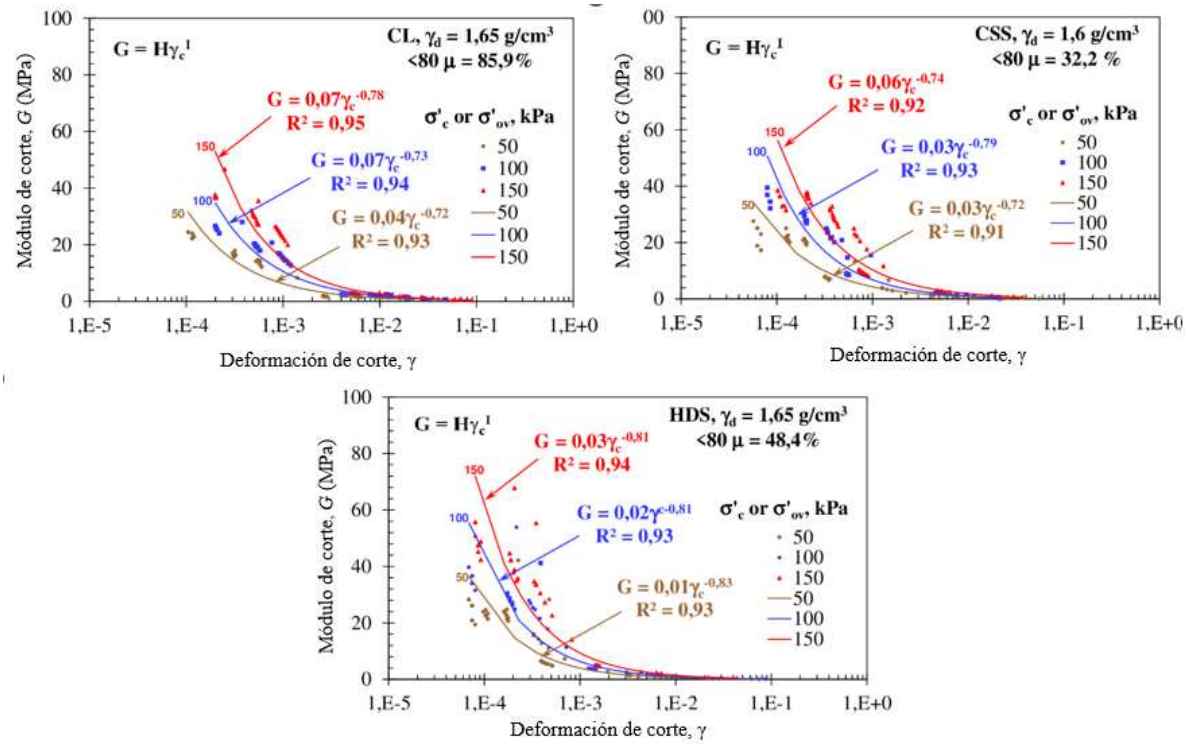



Figura 6. Variación de *G* en los ensayos cíclicos de corte simple y triaxial en función de γ para distintos valores de la tensión efectiva de consolidación: a) CL; b) CSS; c) HDS.

Los resultados experimentales mostrados en la Figura 6 indican que, en γ entre $10^{-4}$ y $10^{-3}$, la tensión efectiva de consolidación ejerce una influencia muy significativa en la degradación del módulo de corte, incluso mayor que la propia deformación. Además, para una misma deformación, el módulo de corte disminuye considerablemente al reducirse la tensión efectiva. Para deformaciones superiores a $10^{-4}$, la degradación del módulo es prácticamente independiente del contenido de finos (<2 μm), como se observa al comparar los materiales CSS y HDS. Independientemente del material, es posible definir funciones empíricas que describen la degradación de la rigidez en función de la deformación.

De esta manera, se propuso un ajuste para estimar la degradación del módulo de corte, considerando γ y $\sigma'_c$, que sigue la forma:

$$G = A \cdot \gamma^B \cdot \sigma'_c + C \cdot \gamma^D \quad (1)$$

donde A, B, C y D son constantes empíricas que se muestran en la Tabla 6 para cada tipo de estériles.

Tabla 6. Valores de las constantes empíricas.

| **Material** | ***A*** | ***B*** | ***C*** | ***D*** |
|---|---|---|---|---|
| CSS | 0.0003 | -0.76 | 0.0076 | -0.73 |
| HDS | 0.0002 | -0.80 | 0.0029 | -0.87 |
| CL | 0.0003 | -0.84 | 0.0817 | -0.4 |

La Figura 7 se obtuvo considerando coeficientes de determinación ($R^2$) superiores a 0.92. Esto indica un excelente ajuste a los resultados experimentales. Estas funciones pueden expresarse en términos de la tensión efectiva de consolidación mediante las funciones empíricas propuestas en este trabajo. Esta figura muestra la variación del módulo de corte (G) en función de la deformación cíclica en el rango de $10^{-5}$ a $10^{-1}$, para tensiones efectivas entre 25 y 300 kPa. La principal ventaja práctica de estas funciones es su simplicidad, la posibilidad de obtenerlas mediante un número reducido de ensayos y su fácil incorporación en modelos numéricos.

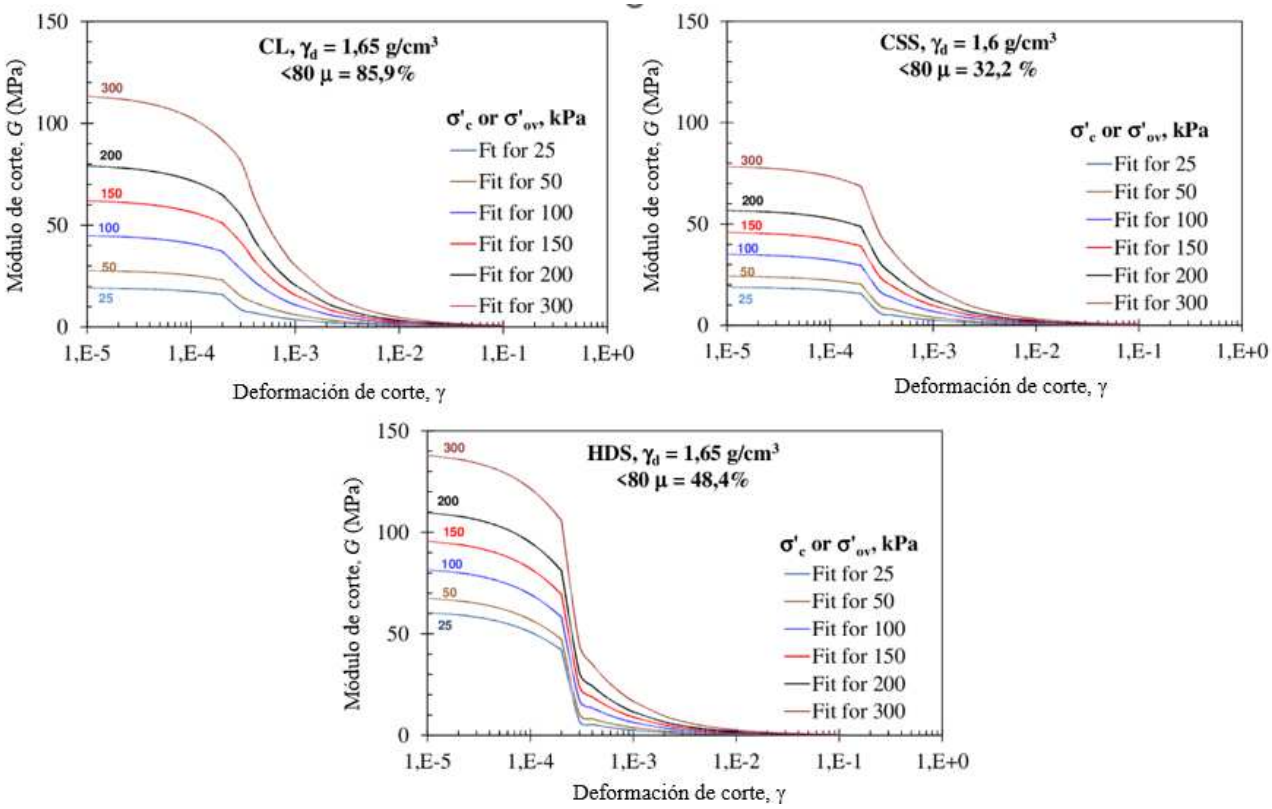



Figura 7. Variación de *G* mediante las funciones empíricas propuestas: a) CL; b) CSS; c) HDS.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología innovadora que integra los resultados de degradación de rigidez obtenidos mediante tres tipos de ensayos. Las conclusiones se basan en ensayos de identificación, así como en 108 ensayos de columna resonante, 27 de corte simple cíclico y 29 de triaxiales cíclicos, realizados en tres materiales procedentes de las minas de Riotinto (Huelva): CSS, HDS y CL.

Los materiales CSS y HDS son de naturaleza granular, con alto contenido de finos no plásticos, mientras que el material CL se clasifica como arcilla de baja plasticidad. Debido a la presencia de minerales pesados, los tres materiales presentan valores elevados de peso específico.

A partir del análisis realizado, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En los ensayos de columna resonante es necesario el uso de dispositivos auxiliares específicos que garanticen la correcta alineación de las probetas. Asimismo, se propone una metodología para garantizar la saturación en los ensayos triaxiales.
- Aunque los finos presentes en los materiales CSS (32%) y HDS (48%) no son plásticos, influyen significativamente en el módulo de corte para deformaciones entre $10^{-5}$ y $3 \cdot 10^{-4}$. En este rango, el módulo del material HDS es aproximadamente el doble que el del CSS.
- Para deformaciones entre $10^{-4}$ y $10^{-1}$, el efecto del contenido de finos es prácticamente despreciable. Para deformaciones entre $10^{-5}$ y $10^{-3}$, el módulo de corte disminuye significativamente al reducirse la tensión efectiva. Para deformaciones superiores a $10^{-3}$, el módulo tiende a independizarse de esta variable.
- Se proponen funciones empíricas que permiten estimar la degradación de la rigidez en un amplio rango de deformaciones ($10^{-5}$ a $10^{-1}$), incluso para valores de tensión no ensayados. La metodología desarrollada permite estimar el módulo de corte a partir de un número reducido de ensayos. Como principal aportación del trabajo, se proponen dos funciones empíricas simples que pueden incorporarse fácilmente en modelos numéricos para analizar el comportamiento dinámico de suelos.

## AGRADECIMIENTOS

Esta publicación forma parte del proyecto PID2022-139202OB-I00, Redes neuronales y técnicas de optimización para el diseño y mantenimiento seguros de infraestructuras de transporte: geotecnia de rocas volcánicas y estabilidad de taludes (IA-Pyroslope), financiado por la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE.

## REFERENCIAS

Alarcon-Guzman, A., Chameau, J.L., Leonards, G.A. y Frost, J.D. (1989). Shear Modulus and Cyclic Undrained Behavior of Sands. *Soils and Foundations*, 29(4), 105–119.

Ciancimino, A., Cosentini, R.M., Foti, S. et al. (2023). The PoliTO–UniRoma1 database of cyclic and dynamic laboratory tests: assessment of empirical predictive models. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 2569–2601. https://doi.org/10.1007/s10518-022-01573-y

Ciancimino, A., Lanzo, G., Alleanza, G.A., Amoroso, S., Bardotti, R., Biondi, G. et al. (2020). Dynamic characterization of fine-grained soils in Central Italy by laboratory testing. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(12), 5503–5531. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00611-6

Finn, W.D.L. y Vaid, Y.P. (1977). Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear test. En: *Preprints of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, 10–14 enero, Vol. 6, 7–12.

Hardin, B.O. (1965). The Nature of Damping in Sands. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 91(SM1), 63–97.

Hardin, B.O. y Drnevich, V.P. (1972a). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(SM6), 603–624.

Hardin, B.O. y Drnevich, V.P. (1972b). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equation and Curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(SM7), 667–692.

Hoyos, L.R., Suescún-Florez, E.A. y Puppala, A.J. (2015). Stiffness of intermediate unsaturated soil from simultaneous suction-controlled resonant column and bender element testing. *Engineering Geology*, 188, 10–28. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.014

Krizek, R.J., Maclean, F.G. y Giger, M.W. (1974). Effect of Particle Characteristics on Wave Velocity. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 100(1), 89–94.

Kuribayashi, E., Iwasaki, T. y Tatsuoka, F. (1974). Effects of Stress Conditions on Dynamic Properties of Sand. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 12.

Kuribayashi, E., Iwasaki, T. y Tatsuoka, F. (1975). Effects of stress-strain conditions on dynamic properties of sands. *Proceedings of JSCE*, No. 242.

Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A. y Pedroni, S. (1997). Shear modulus and damping of soils. *Géotechnique*, 37(3), 603–617.

Molina-Gómez, F., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. y Camacho-Tauta, J. (2020). Dynamic properties of two historically liquefiable sands in the Lisbon area. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, 106101.

Molina-Gómez, F., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. y Camacho-Tauta, J. (2023). Small-strain stiffness of liquefiable sands: a comparison between bender elements and resonant-column tests. En: *Proceedings of the 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Porto.

Noh, D.-H., Park, J., Santamarina, J.C. y Kwon, T.-H. (2023). Multimode Free-Vibration Decay Column: Small-Strain Stiffness and Attenuation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(6).

Rios, S., Kowalska, M. y Viana da Fonseca, A. (2021). Cyclic and Dynamic Behavior of Sand–Rubber and Clay–Rubber Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 3449–3467.

Shirkavand, D. y Fakharian, K. (2023). A comparison of shear modulus of unsaturated sand in triaxial and simple shear tests under different strains and suctions. *Engineering Geology*, 315, 106972.