

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE JALES SATURADOS EN MUESTRAS INALTERADAS

OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

Los depósitos de jales o relaves, estructuras diseñadas para contener los residuos mineros, desempeñan un papel crucial en la gestión de los desechos generados por la industria minera (Figura 1). A lo largo de la historia, hemos sido testigos de eventos desafortunados que han revelado la vulnerabilidad inherente de estas estructuras y han subrayado la necesidad crítica de una gestión eficaz y segura de los relaves. Las fallas en los depósitos de jales no sólo representan amenazas ambientales significativas, también, pueden tener consecuencias devastadoras para las comunidades cercanas, para la biodiversidad y para la calidad del agua.

A medida que la demanda mundial de minerales ha aumentado, también, lo ha hecho la cantidad de jales generados, haciendo que los depósitos de jales sean instalaciones cada vez más grandes y complejas. La gestión segura y sostenible de estas estructuras constituye un desafío crucial en la industria minera contemporánea, donde la caracterización

dinámica de estas estructuras emerge como un elemento fundamental para evaluar y garantizar su estabilidad estructural a lo largo del tiempo.

La caracterización mecánica implica la evaluación de la resistencia y comportamiento de los jales bajo diferentes condiciones de esfuerzo, compacidad relativa y cantidad de finos del material. Esta información es esencial para determinar la estabilidad estructural de las instalaciones de almacenamiento de jales y para prever posibles eventos de falla.

Un análisis de estabilidad integral requiere la combinación de datos mecánicos e hidráulicos para modelar con precisión el comportamiento de los jales en diferentes escenarios. La información resultante se utiliza para diseñar medidas de mitigación, optimizar la gestión de residuos y garantizar la seguridad a largo plazo de las instalaciones de almacenamiento de estos materiales. La caracterización mecánica e hidráulica no sólo es fundamental para cumplir con los requisitos normativos y ambientales, también, es esencial para prevenir desastres, proteger el entorno circundante y asegurar la sostenibilidad.

En particular, la caracterización dinámica implica el análisis de las respuestas de los depósitos de relaves frente a cargas dinámicas, como las generadas por eventos sísmicos. Este enfoque no sólo reconoce la variabilidad de las fuerzas aplicadas sobre el depósito de jales, también considera las posibles interacciones dinámicas entre los materiales que la componen.

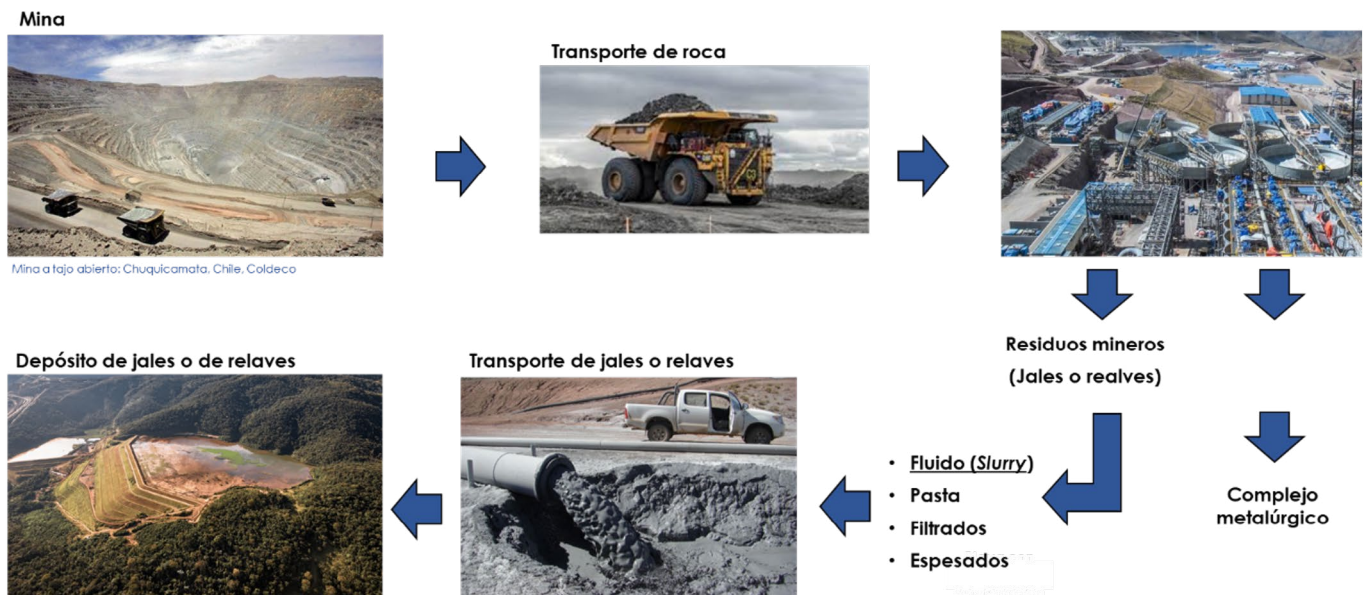


Figura 1. Proceso de extracción de roca, beneficio del mineral y almacenamiento de jales

En este trabajo se explora la importancia crítica de la caracterización dinámica de los jales y las variables que influyen en su comportamiento.

La caracterización dinámica de los jales bajo condición dinámica puede ser evaluada a partir de ensayos de laboratorio, los cuales, generalmente utilizan una señal periódica senoidal como excitación. Los equipos que comúnmente se utilizan son la columna resonante, que permite niveles de distorsión angular de 10-5 a 10-2 %, así como el equipo triaxial cíclico, con niveles de deformación de 10-2 a 10 %; este último si el suelo lo permite.

Las dos propiedades principales para el cálculo de respuesta son el módulo de rigidez al cortante dinámico G , el amortiguamiento λ y su variación con el incremento de la distorsión angular γ . Son numerosos los estudios realizados para la caracterización dinámica de suelos, desde los años sesenta cuando se dio un importante auge a este tipo de ensayos a la fecha (Hardin y Richart, 1963; Hall y Ricart, 1963; Hardin y Black, 1969; Drenevich y Richart, 1970; Hardin y Drnevich, 1972; Troncoso, 1995; Flores y Romo, 1998; entre otros).

En el caso de suelos granulares con bajo contenido de finos, se ha encontrado que las variables que gobiernan el comportamiento dinámico son la compacidad relativa y el nivel de esfuerzos efectivos. En el caso de los jales, cuyos contenidos de finos pueden estar entre 10 y 100 % con un intervalo de relación de vacíos entre 0.4 y 1.6, el porcentaje de finos toma un valor relevante en el comportamiento mecánico de estos materiales.

El objetivo de este trabajo es la caracterización dinámica de los jales inalterados de dos depósitos mineros, utilizando las dos técnicas descritas. Se buscará definir las variables que gobiernan el comportamiento dinámico de estos materiales.

DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

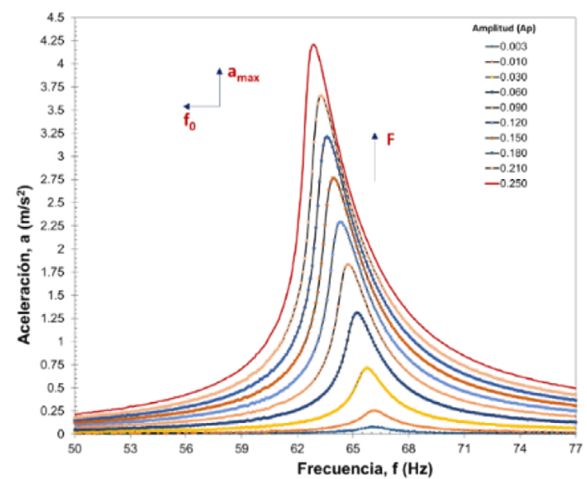
Ensayo de columna resonante (CR)

La instrumentación del equipo está compuesta por tres sensores de presión (confinamiento, contrapresión y exceso de presión de poro) de 7.5 kg/cm², un sensor de cambio de volumen de 30 cm³ de capacidad y un acelerómetro de 2g.

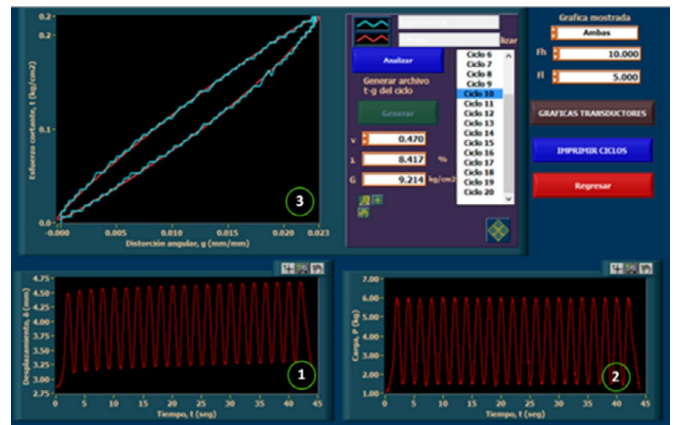
Para la ejecución del ensayo se aplica una señal de torsión periódica senoidal con fuerza constante, se incrementa la frecuencia de excitación en incrementos de 0.1 Hz y se registra la aceleración pico a pico de respuesta del suelo (barrido de frecuencias). Se grafica la aceleración de respuesta con la frecuencia de excitación y se define la curva de respuesta bajo vibración forzada, de la cual, se determina la aceleración máxima ($a_{\text{máx}}$) y la frecuencia a la que ésta se presenta, definida como frecuencia de resonancia (f_0). Se traza una línea horizontal en el valor de ($a_{\text{máx}} / \sqrt{2}$), donde cruza la curva se identifican las frecuencias f_1 y f_2 . Con estos valores y los momentos polares de inercia de la probeta y del sistema que aplica la excitación, se determina el módulo de rigidez al cortante dinámico G , el amortiguamiento λ , y la distorsión angular γ (Figura 2a).

El procedimiento anterior se aplica para diferentes valores incrementales de fuerzas de excitación y para cada una de éstas se obtiene su respectiva curva de respuesta bajo vibración forzada, de tal forma que se tendrá un punto de la curva de degradación del módulo de rigidez y de incremento del amortiguamiento, a la que se suman los resultados del ensayo triaxial cíclico.

Debido a que las pruebas de CR son no destructivas, es posible consolidar la muestra por etapas, para obtener juegos de curvas de al menos tres niveles de esfuerzo de consolidación, de tal forma que se puede graficar el Módulo de rigidez máximo con el incremento del esfuerzo efectivo.



a) Resultados de columna resonante



b) Resultados de triaxial cíclico

Figura 2. Resultados experimentales de ensayos dinámicos

Ensaye triaxial cíclico (TxC)

El ensaye triaxial cíclico se puede hacer en condiciones UU o CU, según se requiera. Para realizar este ensaye se ocupa un equipo triaxial cíclico compuesto por una cámara donde se aloja una celda de carga hidrostáticamente compensada (sumergible) de 250 kg de capacidad junto con la muestra de suelo que se ensayará. El vástago que aplica el esfuerzo desviador a la parte superior de la probeta de suelo, se conecta a través con un pistón neumático de doble vía que está a su vez conectado a un sensor de desplazamiento axial (LVDT) de 12 mm de carrera total para la medición y a una servo-válvula neumática con la que se hace el control del sistema para que opere a carga o desplazamiento controlado, por medio de un sistema de control y adquisición de datos automático.

El sistema cuenta, además, con un sensor de cambio de volumen de presión diferencial de 30 cm³ de capacidad y tres sensores de presión de 7.5 kg/cm² de presión nominal de trabajo para medir el confinamiento, la contrapresión y el exceso de presión de poro.

Operando a carga controlada se aplica un esfuerzo desviador cíclico con 20 ciclos y una frecuencia de 1 Hz. Del total de ciclos se suele tomar intermedio (ciclo 10) y se grafica la curva carga axial vs desplazamiento. Se hacen algunos cálculos proponiendo un valor de relación de Poisson ν , y se llega al ciclo de esfuerzo cortantes τ vs distorsión angular γ . De aquí se obtiene el módulo de rigidez secante G , el amortiguamiento λ y la distorsión angular γ (Figura 2b). Se aplican esfuerzos desviadores mayores hasta llegar a la falla de la probeta.

Con los resultados del ensaye triaxial cíclico, sumado a los obtenidos con la columna resonante, es posible tener la curva completa de la degradación del módulo de rigidez y del incremento del amortiguamiento, con el aumento de la distorsión angular (Figura 3).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se ensayaron 12 probetas inalteradas de dos sitios, 6 del denominado S1 y 6 del S2, ambos de depósitos de jales del estado de Colima, con tres niveles de esfuerzo efectivo de consolidación para el ensaye de CR y el esfuerzo intermedio para la TxC. El porcentaje de finos osciló entre 7.69 y 98.29; la relación de vacíos entre 0.436 y 1.261; la densidad relativa de la fase sólida entre 2.56 y 3.52; el grado de saturación inicial entre 58 y 100 %; el peso específico entre valores de 1.55 a 2.3 t/m³; y el peso específico seco γ_d , entre 1.2 y 2.18 t/m³. Las muestras ensayadas se extrajeron en tubo Shelby de 4" y las probetas se labraron del mismo horizonte, para considerar la misma conformación estratigráfica.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En el caso de los ensayos de CR, se aplicaron tres niveles de esfuerzo de consolidación de 0.80, 1.3 y 2 kg/cm² y se obtuvieron las curvas de degradación del módulo G . De estas curvas se identificó el valor mayor de G , definido como $G_{m\acute{a}x}$, el cual se graficó con respecto al esfuerzo efectivo de consolidación. En la Figura 4 se muestra la variación del módulo de rigidez máxima con el esfuerzo efectivo de consolidación, donde se puede apreciar que para este tipo de materiales los valores de $G_{m\acute{a}x}$ oscilan entre 365 y 1035 kg/cm², para este intervalo de esfuerzos. Es claro el incremento de rigidez que sufre la probeta de suelo al aumentar el esfuerzo efectivo, sólo que con una tasa de cambio diferente.

Al graficar el valor de $G_{m\acute{a}x}$ correspondiente a un esfuerzo efectivo de 0.80 kg/cm², se aprecia que en general presentan una tendencia de incremento con el aumento del peso específico seco del material γ_d , tal como se aprecia en la Figura 5. Se puede ver que, aunque presentan dispersión los resultados, la variación es casi lineal en el intervalo de estudio.

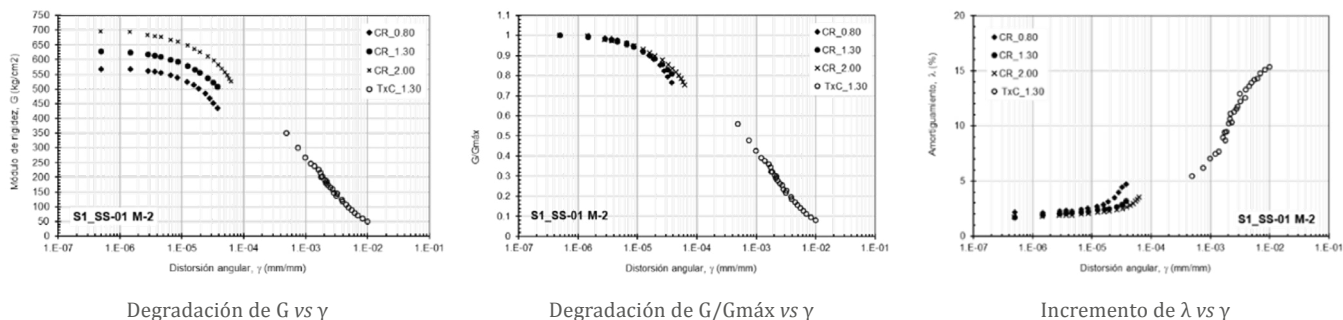


Figura 3. Ensaye triaxial para un nivel de esfuerzo desviador cíclico

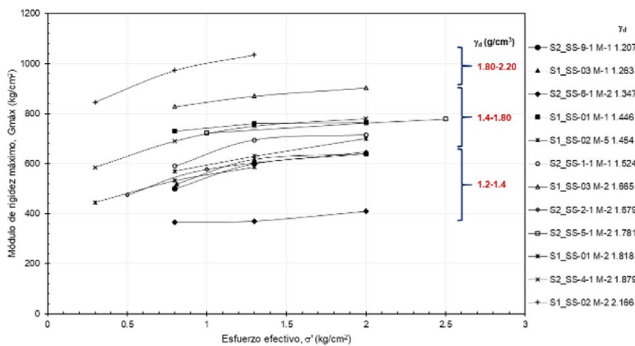


Figura 4. Variación de G_{\max} con el esfuerzo efectivo de consolidación σ'_c

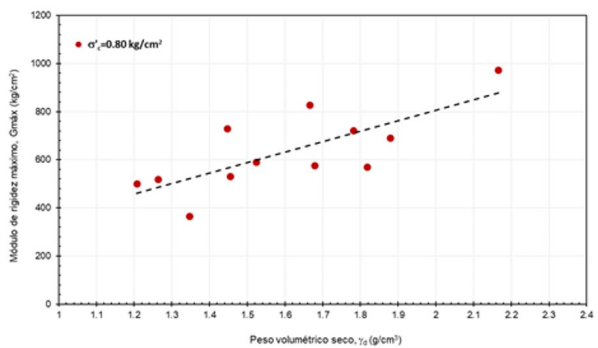


Figura 5. Variación de G_{\max} con el peso específico seco γ_d

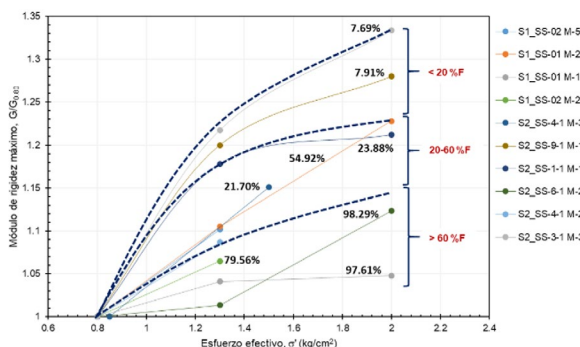


Figura 6. Variación de normalizada ($G_{\max}/G_{\max,0.80}$) con el esfuerzo efectivo de consolidación σ'_c

Si se toma como referencia el módulo de rigidez máxima normalizado con respecto al obtenido para un esfuerzo efectivo de 0.80 kg/cm^2 , la tasa de incremento depende en buena medida del porcentaje de finos del material, siendo menor la tasa con el incremento del porcentaje de finos: para jales con porcentaje de finos menores a 20%, el incremento puede estar entre 22 y 33%; para un intervalo de 20 a 60% de finos, entre 15 y 22% de incremento; y para materiales con más de 60% de finos, incrementos entre 4 y 15%, como se muestra en la Figura 6.

Lo anterior permite definir el peso específico seco y el porcentaje de finos como dos de las variables importantes en el comportamiento dinámico de los jales saturados en condiciones inalteradas.

CONCLUSIONES

En el estudio realizado con 12 muestras inalteradas de jales de dos unidades mineras, se ejecutaron ensayos dinámicos de columna resonante y triaxial cíclica. Se pudo observar que el módulo de rigidez al cortante dinámico máximo se ve influenciado de forma directa por el peso específico seco del material.

Si se normalizan los módulos al obtenido con un esfuerzo efectivo de consolidación de 0.80 kg/cm^2 ; se puede apreciar que la tasa de cambio disminuye conforme aumenta el porcentaje de finos, iniciando con una tasa de cambio de 34% cuando los finos son del orden de 7%, pero cambia a una tasa de cambio de 10% cuando el porcentaje de finos es cercano a 100%. Conforme se incrementa el porcentaje de finos de la muestra, menor es la rigidez del suelo.

Referencias

- Drenevich, V. P. y Richart, F. E. Jr. (1970). Dynamic prestraining of dry sand. Journal of SMF Div, ASCE, Vol 96, No. SM2, Mar., pp. 453-469.
- Flores, O. (1997). Comportamiento dinámico de jales, Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM.
- Flores, O. (2017). Determinación experimental de parámetros dinámicos en campo y laboratorio. SMIG, Villahermosa, Tab.
- Flores, O. y Romo, M. P. (1999). Comportamiento dinámico de residuos mineros. Revista del CICM, diciembre.
- Hardin, B. O. y Richart, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils, ASCE, Vol. 89, pp. 33-65.
- Hardin, B. O. y Black, W. L. (1969). Closure to vibration of normally consolidated clay, Proc. Of ASCE, Vol. 95, SM6, pp. 1531-1537.
- Hardin, B. O. y Drenevich, V. P. (1972). shear Modulus and damping in soils: design equations and curves, Journal of the Soils Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, July, pp. 667-692.
- Hall, J. R. y Richart, F. E. (1963). Dissipation of elastic waves energy in granular soils, Proc. of ASCE, Vol 89, SM6, pp 27-56.
- ICOLD (1995). Tailings dams and seismicity, Bulletin 98.