

Evaluación de la velocidad de onda cortante y amortiguamiento en el laboratorio de relaves no saturados provenientes de operaciones mineras en el Distrito Topia (México)

Assessment of S-wave velocity and damping ratio in the laboratory of unsaturated tailings from mining operations in the Topia District, Mexico

Alfonso Fernández-Lavín¹, Claudia Chamorro-Zurita¹

¹ Sismoterra. Manabí – Ecuador. E-mail: afernandez@sismoterra.com.ec, cchamorro@sismoterra.com.ec.

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 03-06-2023

Fecha de aceptación: 23-08-2023

Resumen

Las estructuras que almacenan relaves mineros contienen sólidos finamente molidos, que se desechan del proceso de beneficio del mineral de la industria minera. El diseño bajo condiciones sísmicas puede realizarse mediante varios métodos computacionales disponibles, aunque es importante comprender el comportamiento de los relaves bajo cargas cíclicas, especialmente cuando no están saturados. Este artículo tiene como objetivo presentar la influencia de las fuerzas capilares, la densidad relativa y el esfuerzo de confinamiento inicial en el comportamiento dinámico de materiales no saturados de operaciones de extracción y procesamiento de plata, plomo y zinc. Se utilizó el método de apisonamiento en estado húmedo para preparar las probetas que se ensayaron en los equipos de la columna resonante y el triaxial cíclico. Se observó que en condición seca se obtuvo la mayor velocidad de onda de corte (V_s) la cual disminuyó importantemente a medida que el grado de saturación aumentó alrededor del 16.6 %, luego la V_s varió levemente. También, se propone una ecuación que relaciona las V_s respecto al grado de saturación, la relación de vacíos y la presión de confinamiento para los relaves mineros estudiados, observando que los valores experimentales y calculados se ajustan bien.

Palabras clave: Relave minero no saturado, columna resonante, triaxial cíclico, módulo de corte, amortiguamiento.

Abstract

Tailing disposal structures contain finely ground solids, which are discarded from the ore profit process of the mining industry. Its design under shaking can be carried out using several computational methods that are available even though it is important to understand the mine tailing behavior under cyclic loads especially when they are unsaturated. This paper aims to present the influence of the capillary forces, the relative density, and the initial confining stress on the dynamic compartment of unsaturated products of the crushing and processing of silver, lead, and zinc operations. It was used the moist tamping method to prepare the specimens that were tested on a resonant column and cyclic triaxial devices. It was observed that in a dry condition, the highest shear wave velocity (V_s) was achieved which strongly decreased as the degree of saturation increased around 16.6 %, then the V_s slightly varied. Moreover, an equation is also proposed for relating the V_s concerning the degree of saturation, the void ratio, and the confining pressure for the studied mine tailings, observing that experimental and calculated values fit well.

Keywords: Unsaturated mining tailings, resonant column, cyclic triaxial cell, shear modulus, damping ratio.

1. INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, el suelo está formado por la unión de diferentes tipos de partículas cuyas características físicas y mecánicas pueden variar de unas a otras debido principalmente a su composición mineralógica, tamaño y forma, entre otras. Las combinaciones de estos factores, junto con el estado de esfuerzos actuante, gobiernan el comportamiento esfuerzo-deformación de una masa de suelo. En el caso de suelos originados por acciones antrópicas, como son los relaves mineros, su mineralogía se rige por el tipo de minerales remanentes del proceso de explotación no útiles en ese momento. Por otro lado, la cantidad, tamaño y forma de las partículas dependerá del tipo de molienda a la que fue expuesta la roca de origen, procedimiento que permite a la industria minera obtener superficie específica determinadas para optimizar el proceso de explotación y poder extraer los minerales deseados con los menores costos. Finalmente, el desempeño de estas estructuras de almacenamiento está influenciada por la técnica de disposición y la historia de esfuerzos, entre otros. Para el diseño de este tipo de estructuras, se deben seleccionar muestras representativas del proceso de extracción en la planta; mediante pruebas de laboratorio establecer las características esfuerzo-deformación y los parámetros de diseño de la estructura de almacenamiento [1].

Generalmente, la disposición de los relaves mineros hasta su ubicación final se realiza de forma líquida, es decir, estos materiales viajan en forma de lodos a través de un sistema de tuberías y bombas de impulsión [2] pero también pueden ser transportados utilizando maquinaria pesada cuando son previamente tratados con filtros o prensas para reducir su contenido de agua y convertirlos en materiales no saturados [3]. La selección del mejor método de disposición requiere un análisis previo de las características de los relaves mineros, los ciclos de disposición, el clima, las condiciones sísmicas, así como de los parámetros considerados para el diseño de la estructura que los albergará. Además, este tipo de estructuras está influenciado por acciones externas derivadas de su funcionamiento, interacción con la atmósfera y el material de cimentación. Cuando los relaves mineros son transportados o dispuestos en forma de lodos, durante la operación de almacenamiento, normalmente se observa una zona saturada por debajo de la línea de corriente superior y otra zona no saturada por encima de ella [4]. En la zona no saturada, las tensiones capilares juegan un papel importante en la interacción entre partículas, tendiendo a aumentar la resistencia del material y reducir la compresibilidad, propiedades que pueden verse rápidamente disminuidas si el material se satura (los vacíos son llenados con un líquido).

Debido a que en la literatura disponible la información de referencia para el estudio de relaves mineros no saturados aún es limitada, el propósito de este estudio es investigar la variación de la velocidad de onda de corte (V_s) y el amortiguamiento (D) en probetas formadas con la técnica

de apisonamiento en húmedo. Así, se ensayaron los relaves mineros producto de la extracción de plata, plomo y zinc en el Distrito Topia, variando su grado de saturación, relación de vacíos y esfuerzos de confinamiento en los equipos de columna resonante y cámara triaxial cíclica. A partir de estos resultados, se plantea una expresión matemática que permite obtener la V_s en función de las variables antes mencionadas para una aplicación práctica.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Elaboración de las probetas

Se utilizaron relaves mineros del Distrito Minero de Topia (Durango, México), estos materiales fueron obtenidos mediante la trituración y procesamiento de la roca de origen para la explotación de plata, plomo y zinc. Según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ASTM D2487), estos materiales se clasifican como arenas mal graduadas y limosas (SP-SM) y la gravedad específica de sus partículas fue de 2,91. La distribución granulométrica se realizó por tamizado húmedo donde la porción en peso de material fino ($\square 0.075$ mm) fue de 11.6 %, de arena (entre 0.075 y 4.75 mm) 88.4 % y no presentando tamaños de grava. El tamaño medio de partícula (D_{50}) fue de 0,22 mm, el coeficiente de uniformidad C_u ($=D_{60}/D_{10}$) fue 4,00 y el coeficiente de curvatura C_c ($=D_{30}^2/(D_{10} D_{60})$) fue 1,47.

La redondez de las partículas fue igual a 0.35 [5] y por su forma, el material se clasificó como subangular. Se utilizó un programa basado en el procesamiento digital de imágenes para evaluar la redondez de las partículas [6], para este fin, una muestra representativa de partículas de relaves mineros se secó en un horno a 105-110 °C durante 24 h y luego se tamizó en diferentes fracciones uniformes para obtener granos individuales. Las partículas se colocaron sobre una base de color negro para eliminar los efectos de sombra y se organizaron manualmente de tal manera que las partículas permanecieran en una posición estable antes de que se tomara la imagen digital, como se muestra en la Fig. 1.

La redondez de las partículas se evaluó a través de un microscopio estereoscópico (Zeiss Stemi 2000c) que tiene un rango de zoom entre 0,65x y 5,0x. El cabezal de visualización triocular permite agregar una cámara digital axial (ERc 5s) que brinda el beneficio de la visualización estereoscópica simultánea, mientras se toman fotografías o se trabaja en el modo de monitor. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Separación de Minerales del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Una imagen digital típica de partículas de relaves mineros estudiados se presenta en la Fig. 1, donde se pueden observar partículas de arena tamizadas previamente (tamiz No. 40).

El tamaño de las partículas se amplió hasta 2,5 veces para apreciar la forma de las partículas producto de la trituración de minerales para extraer metales.

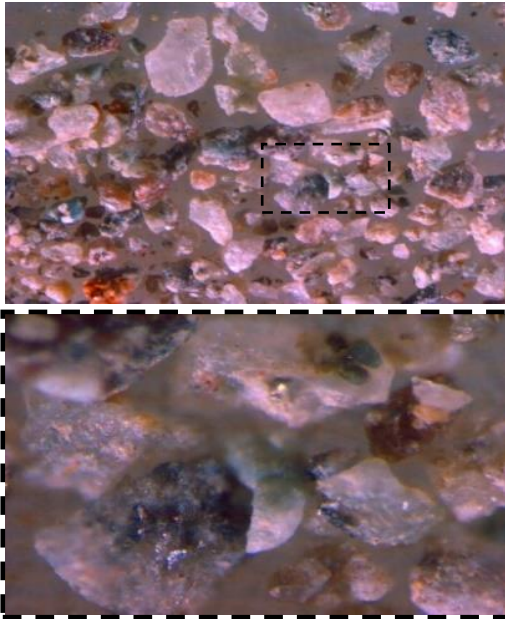


Figura 1: Partículas de relaves mineros (tamiz No. 40) en condiciones secas

Las probetas no saturadas se prepararon utilizando la técnica de apisonamiento en condiciones húmedas y se utilizaron 10 capas y 9 golpes/capa (se utilizó una altura constante de suelo en cada capa). Es importante mencionar que se utilizó el procedimiento interno del Instituto de Ingeniería, una versión ligeramente modificada del método de subcompactación descrito por Ladd (1978) [7]. Debido a que se ha observado la importancia del método de elaboración de las probetas y su influencia en los parámetros obtenidos [8, 9], para observar la uniformidad y la repetibilidad de las probetas reconstituidas, se calculó la densidad relativa inicial a partir de las mediciones de la geometría de la muestra inmediatamente después de completar la preparación.



Figura 2: Probeta compactada por el método húmedo

Como se puede visualizar en la Fig. 2, el método húmedo utilizado produce especímenes muy uniformes y no hay capas visibles con segregación de finos o sobre compactación.

En la Tabla 1 se muestra el programa experimental utilizado en este estudio y se observa que las probetas numeradas del 1 a 5 fueron fabricadas manteniendo constante la masa del pisón (1000 g) y varió el contenido de agua. Por otro lado, las probetas numeradas como 6 y 7 se fabricaron manteniendo el contenido de agua constante y varió la masa del pisón (1000 g para la muestra 6 y 3000 g para la muestra 7) para observar la variación de la densidad relativa. Estas muestras se prepararon directamente en la base tanto de la columna resonante como de la cámara triaxial utilizando un molde dividido. Además, se midió el contenido de agua del material, la altura y el diámetro iniciales de las muestras en cuatro ubicaciones para conocer las relaciones fundamentales de cada una de las probetas. Es interesante mencionar que durante la etapa de elaboración de las probetas no se utilizó vacío para mantenerlas erigidas durante el montaje de los equipos, con el fin de mantener las condiciones preestablecidas. Cada muestra se probó tanto en la columna resonante como en la cámara triaxial bajo esfuerzos confinantes de 39,2 kPa, 78,4 kPa y 117,6 kPa.

Tabla 1: Programa experimental de las probetas de relaves

No.	w (%)	Densidad (kN/m ³)	e	Sr (%)	Densidad relativa (%)
1	0	16.97	0,68	0,0	100,0
2	5	17.07	0,75	20,0	88,3
3	2.5	16.28	0,78	8,4	82,0
4	20	19.42	0,75	76,4	88,1
5	5	16.09	0,87	18,1	71,3
6	10	16.78	0,88	35,0	69,0
7	5	13.93	1,16	13,4	26,5

w (%) = contenido de agua, e = relación de vacíos y Sr (%) = grado de saturación

2.2. Equipos de laboratorio

Las probetas fueron ensayadas en una cámara triaxial cíclica y una columna resonante que se encuentran en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, conforme se muestran en la Fig. 3. Estos equipos están previstos con un panel de control de presión y un sistema operativo especializado para su operación. Para la prueba triaxial, la carga axial se midió con una celda de carga sumergible y la deformación axial de la muestra se midió con un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) colocado en la parte superior de la celda. En las pruebas de columna resonante, las probetas estuvieron fijas en la

parte inferior y libre para rotar en la superior. Se aplicó una excitación torsional armónica por medio de un sistema de carga electromagnético usando una amplitud constante sobre una variedad de frecuencias. La amplitud de la vibración, la frecuencia de resonancia y la aceleración se midieron en el extremo libre de la muestra. Estos valores, junto con las características de la muestra de suelo y el equipo, se utilizaron para la evaluación de la velocidad de onda cortante. Tanto para la prueba triaxial como para la de columna resonante, la presión dentro de las celdas fue controlada por una válvula mecánica, la cual está conectada a un transductor para permitir un registro continuo de la presión isotrópica de confinamiento (39.2 a 117.72 kPa). Además, dado que las pruebas fueron realizadas en probetas no saturadas, no se utilizaron los sensores de cambio volumétrico, contrapresión ni presión de poros.

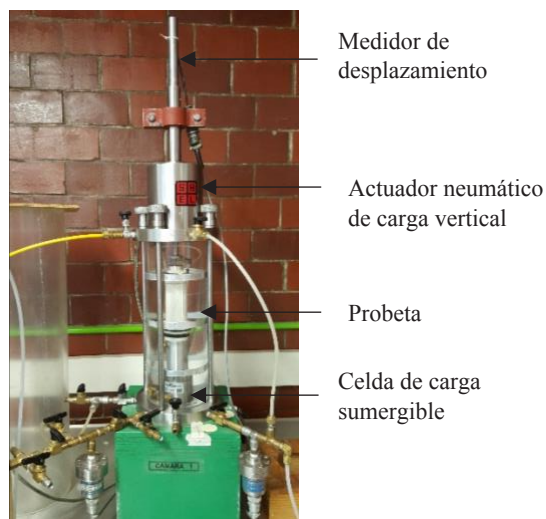


Figura 3: Equipos de laboratorio: cámara triaxial cíclica (arriba) y columna resonante (abajo).

3. RESULTADOS

Para observar el comportamiento esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas, se realizó la normalización de los valores experimentales obtenidos dividiendo a los

módulos de rigidez al corte respecto al módulo de rigidez máximo (G/G_{max}), además poder compararlos entre sí y con datos de otras investigaciones. En la Fig. 4 se observa una comparación de las curvas experimentales normalizadas del módulo de rigidez al corte versus la distorsión angular de esta investigación para un esfuerzo de confinamiento de 98,1 kPa y la compacidad relativa de 25.6, 69.1 y 86.0 % respecto a datos recopilados en referencias previamente publicadas en las que se usaron diferentes tipos de suelos, como son: arenas secas y saturadas [10], relaves mineros saturados [11, 12], suelos de origen marino [13] y suelos lacustres [14]. Se observa que los relaves mineros ensayados presentan un comportamiento similar a aquellas curvas obtenidas en arenas limpias, secas y saturadas; sin embargo, difieren de las curvas obtenidas para otros relaves mineros ensayados en condiciones saturadas. Esta diferencia, respecto a otros relaves mineros, se atribuiría al origen de los materiales ensayados, esto es, a la mineralogía, forma de las partículas y granulometría, que son características propias del proceso de extracción, trituración, molienda y aprovechamiento de la mina de origen. Además, otro factor importante para esta diferencia sería la metodología seguida para la preparación de las probetas en el laboratorio. Por otro lado, el comportamiento de los relaves mineros usados en este artículo difiere de aquellos suelos saturados que poseen una mayor plasticidad, especialmente los de origen lacustre. Este comportamiento se debe a que los suelos con alta plasticidad presentan el tramo elástico de estas curvas mucho más prolongado debido a su microestructura abierta [15].

De manera similar, la Fig. 5 muestra una comparación similar para las curvas de amortiguamiento respecto a la distorsión angular ($D-\gamma$) de esta investigación para un esfuerzo de confinamiento de 98,1 kPa y la compacidad relativa de 25.6, 69.1 y 86.0 %, respecto a los datos recopilados en referencias previamente publicadas en las que se usaron diferentes tipos de suelos, como son: arenas limpias secas y saturadas [16, 17], suelos residuales [18], relaves mineros saturados [11] y suelos de origen marino [13]. En esta misma figura, se observa que los relaves estudiados muestran similitudes en el comportamiento con muestras de origen marino y diferencias con las reportadas para otros relaves mineros, arenas secas/saturadas y suelos residuales. Esta diferencia es ligera para el rango de pequeñas deformaciones angulares ($\gamma < 1 \times 10^{-4}$ m/m) y conforme se aumenta la deformación hasta llegar a la falla de la probeta, las diferencias son más notorias. Es importante mencionar que los parámetros físicos de los relaves mineros que afectan al amortiguamiento todavía no han sido entendidos del todo y todavía se sigue estudiando este tema.

Finalmente, se puede observar que las curvas $G/G_{max} - \gamma$ y $D-\gamma$ están influenciadas por las características físicas y mecánicas de los materiales, como son: la plasticidad, granulometría, OCR, número de ciclos, frecuencia, granulometría, entre otros [19, 20].

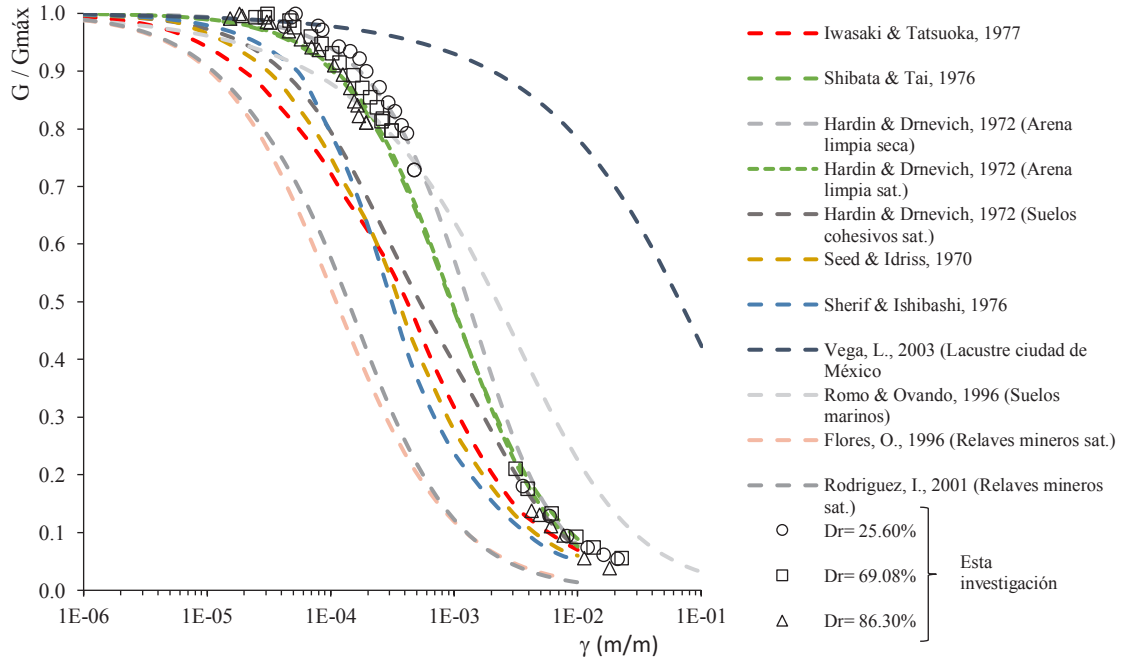


Figura 4: Curvas normalizadas G/G_{max} para esta investigación (puntos) y diferentes tipos de suelos (líneas segmentadas).

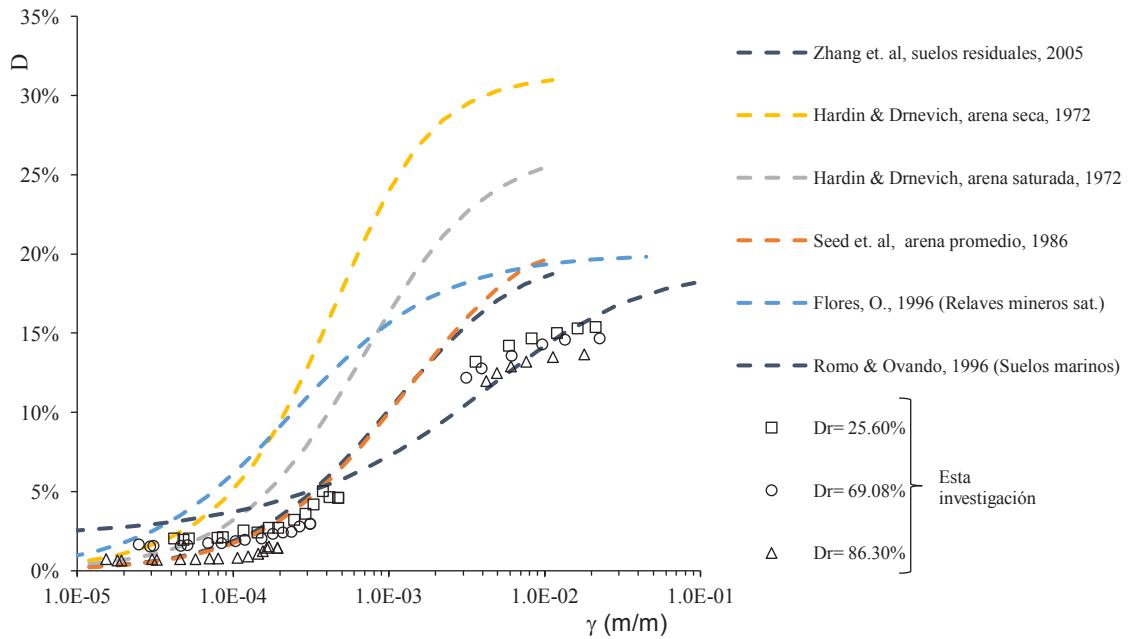


Figura 5: Curvas de amortiguamiento para esta investigación (puntos) y diferentes tipos de suelos (líneas segmentadas)

3.1. Relación entre la Vs y el grado de saturación, la relación de vacíos y el esfuerzo confinante

En la literatura, muchos autores han trabajado en la obtención de una expresión que permita estimar el G_{max} en diferentes suelos para condiciones no saturadas o saturadas [21, 22]. Es importante mencionar que Hardin y Black (1968) [23] propusieron una relación funcional que relaciona el G_{max} con el esfuerzo efectivo medio (σ'_m), la preconsolidación (OCR) y la plasticidad del material (k), según la expresión:

$$G_{max} = AF(e)\sigma'_m OCR^k \quad (1)$$

Donde A es un parámetro de forma y $F(e)$ se relaciona con la relación de vacíos. Por otro lado, Hardin (1978) [24] definió la función de razón, $F(e)$, como:

$$F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2} \quad (2)$$

Tradicionalmente, estas expresiones para estimar G_{max} se han obtenido para suelos saturados. Por otro lado, con el fin de conocer el comportamiento de G_{max} en suelos no saturados, Khosravi y McCartney (2009) [25] revisaron la influencia de G_{max} respecto al esfuerzo efectivo basados en una recopilación de información publicada previamente. Estos investigadores observaron la dependencia de estos suelos con el cambio en el grado de saturación, proponiendo una expresión empírica para predecir el comportamiento de G_{max} con respecto a las curvas de retención de agua, así:

$$G_{m\acute{a}x} = A \frac{Pa^n}{0.3+0.7e^2} \left\{ \frac{\sigma'_m - u_a}{Pa} + \left(\frac{\psi_b}{Pa} + 1 \right) \ln \left[\frac{\psi}{Pa} + 1 \right] \right\}^n \quad (3)$$

Donde Pa es la presión atmosférica, ψ es la succión matricial y ψ_b es la succión debida a la entrada de aire, u_a es la presión del agua y n es un parámetro adimensional. El argumento de este modelo se basa en la idea de que la succión matricial es igual a la tensión efectiva solo para valores de succión menores que la succión de entrada de aire.

Para esta investigación, las propiedades dinámicas del suelo se obtuvieron variando el esfuerzo de confinamiento inicial, la relación de vacíos y el grado de saturación. Las presiones de aire y agua no se midieron durante la ejecución de las pruebas. Se observa que el valor de la velocidad de la onda de corte a pequeña deformación (V_s) varió inversamente con respecto a la relación de vacíos, por lo que se adoptó el uso del parámetro $F(e)$ explicado anteriormente (ec. 2). A partir de los datos experimentales, también se observó que las V_s aumentan conforme se incrementa el esfuerzo de confinamiento. Así como la V_s disminuyó a medida que aumentaba el grado de saturación hasta un 16,6 %, y a partir de este punto su valor varió levemente.

Considerando este comportamiento, se propone una ecuación que relaciona las V_s con la relación de vacíos, el esfuerzo de confinamiento y el grado de saturación, de la siguiente manera:

$$V_s = A F(e) \left(\frac{\sigma_c}{\ln(Sr)} \right)^n \quad (4)$$

Donde A y n son parámetros de forma adimensionales, $F(e)$ es la función de relación de vacíos, σ_c es el esfuerzo de confinamiento (kPa) y Sr es el grado de saturación en porcentaje. Una vez realizado un análisis de ajuste numérico, se obtuvieron los siguientes parámetros: $A=60$ y $n=0,25$.

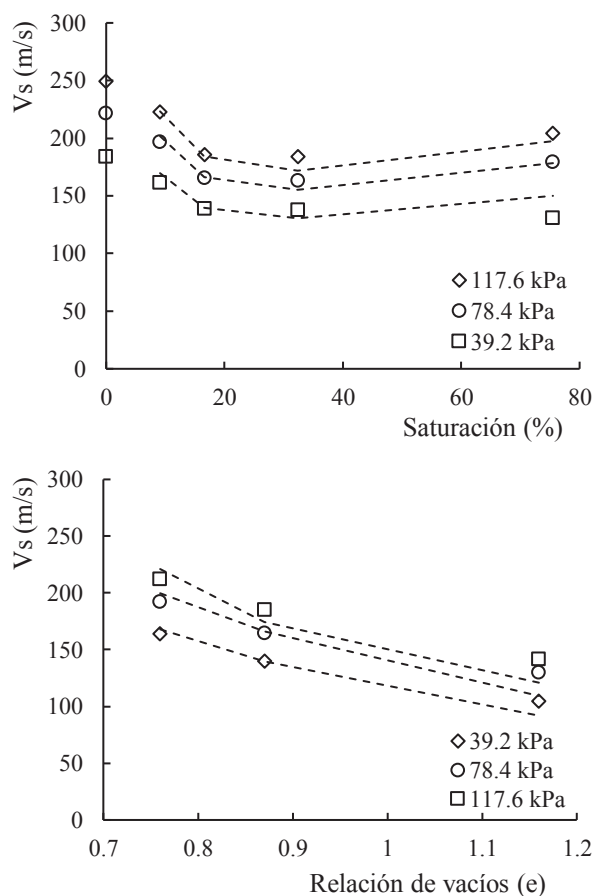


Figura 6: Comparación de los datos experimentales (puntos) y los calculados con la ec. 4 (líneas segmentadas), respecto al grado de saturación (arriba) y relación de vacíos (abajo).

Como se puede observar en la Fig. 6, los datos experimentales y teóricos obtenidos con la ec. 4 son consistentes. No fue posible obtener los valores teóricos para las muestras secas debido a que en la ec. 4, el parámetro del grado de saturación está en el denominador. Además, es interesante observar en la Fig. 6 que cuando el grado de saturación está entre 0 % y 16.6 %, se evidencia una disminución considerable de V_s resultado de una reducción de la fuerza capilar que actúa entre las partículas. Sin embargo, en la sección con mayor grado de saturación, es decir, hasta el 75,5 %, se

nota un leve aumento de las propiedades mecánicas. Este comportamiento también se observó en ensayos monotónicos y poscíclicos para diferentes esfuerzos de confinamiento realizados en probetas preparadas en las mismas condiciones [26].

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Dentro de la actividad minera, las estructuras de almacenamiento de relaves mineros cobran cada vez mayor importancia debido a las grandes dimensiones que pueden llegar a tener y los grandes volúmenes de material almacenado. La importancia de un diseño eficiente y seguro de estas estructuras conlleva a un ahorro de recursos. Por otro lado, la falla de este tipo de estructuras puede ser catastrófica desde el punto de vista ambiental, social, humano y económico, por esta razón, es importante la adecuada caracterización geotécnica de estos materiales.

En países con alta sismicidad cobra importancia relevante el conocimiento de la respuesta dinámica de estos depósitos. Por esta razón, en este artículo se estudia tanto la variación de la velocidad de onda cortante como del amortiguamiento respecto al grado de saturación, relación de vacíos y esfuerzo de confinamiento de relaves mineros ensayados en una columna resonante y una cámara triaxial cíclica.

Las condiciones más favorables de resistencia al esfuerzo cortante para el material estudiado e independientemente del tipo de ensayo realizado se encontraron en condiciones secas. En general, a medida que aumenta el grado de saturación inicial hasta el 16,6 %, se produce una brusca disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y a partir de este punto, un aumento del grado de saturación produce un ligero cambio en las propiedades mecánicas. Por otro lado, un incremento en la densidad relativa inicial de las probetas o del esfuerzo de confinamiento genera un incremento en las propiedades de resistencia a esfuerzos cortantes de la probeta, independientemente del tipo de ensayo realizado.

El comportamiento normalizado del material estudiado muestra una dependencia entre la velocidad de onda cortante y la relación de vacíos, el grado de saturación y el esfuerzo de confinamiento inicial a la que se someten las probetas. Por lo tanto, se propone una ecuación que permite realizar el cálculo de la velocidad de la onda de corte con respecto a las condiciones iniciales de los relaves mineros, la cual presenta una buena relación entre los datos experimentales y los obtenidos con la ecuación propuesta para su uso en la ingeniería práctica.

4.2. RECOMENDACIONES

Este tipo de investigaciones son fundamentales para conocer el comportamiento esfuerzo-deformación de materiales derivados de la actividad minera. Sin embargo, debido a las diferentes técnicas extractivas, de molienda, de aprovechamiento y de disposición final, es necesario estudiar el comportamiento particular del material utilizado en cada operación minera. Para el caso de países que se encuentran en zonas de alta sismicidad, este tipo de investigación cobra importancia para asegurar que este tipo de estructuras sean diseñadas y construidas con eficiencia y seguridad.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Gran Pantera y al Ing. Javier M. Ramírez Vargas por la donación y envío de los relaves mineros con los que se realizó este trabajo. También, se agradece al Dr. Osvaldo Flores y al Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo en la etapa experimental.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Geotechnical Engineering of Dams (2018). Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. y Foster, M, 2nd Edition, CRC Press.
- [2] ICOLD. (1996). Bulletin 106: A guide to tailing dams and impoundments. Design, construction, use and rehabilitation.
- [3] Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings - The fundamentals. Proceedings tailings and mine waste, Vancouver, BC, November 6 to 9.
- [4] Zandarin, M., Oldecop, L., Rodriguez, R. y Zavala, F. (2009). The role of capillary water in the stability of tailing dams. *Engineering geology*, 105, 108-118.
- [5] Youd, T. (1973). Factors controlling maximum and minimum densities of sands. In *Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils* (eds E. T. Selig y R. S. Ladd), STP 523, 98-112.
- [6] Fernández-Lavín, A., y Ovando-Shelley, E. (2021). Mine tailings particles: roundness and sphericity assessment by an image-based program. *Proceedings of the 6th GeoChina International Conference on Civil y Transportation Infrastructures: From Engineering to Smart y Green Life Cycle Solutions – Nanchang, China, July 2021*, K. Yao et al. (Eds.), 23-32.

- [7] Ladd, R. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16-23.
- [8] Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S., y Sudo, H. (1979). Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods. *Soils and Foundations*, 19(1), 39-54.
- [9] Ishihara, K. (Ed.). (1995). *Earthquake geotechnical engineering*. AA Balkema.
- [10] Iwasaki, T., Tatsuoka, F., y Takagi, Y. (1978). Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and foundations*, 18(1), 39-56.
- [11] Flores, O. (1996). "Propiedades dinámicas de jales". Tesis de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [12] Rodríguez, I. (2001). "Influencia del contenido de finos en el comportamiento no drenado de un residuo minero procedente de San Luis Potosí". Tesis de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [13] Romo, M. y Ovando-Shelley, E., 1996. Modelling the Dynamic Behaviour of Mexican Clays. *Memorias de Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Junio 23 - 28, 1996, Acapulco, México.
- [14] Vega, L. (2003). "Análisis y modelación de algunas propiedades dinámicas de las arcillas del ex lago de Texcoco". Tesis de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [15] Dobry, R. y Vucetic, M., 1987. Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits. *Memorias de Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos*, agosto 13 - 14, Ciudad de México, México, Volumen 2, pp. 51-89.
- [16] Hardin, B. y Drnevich, V., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(6), pp. 603-624.
- [17] Seed, H. B., R. T. Wong, I. M. Idriss, and K. Tokimatsu. 1986. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils." *J. Geotech. Eng.* 112 (11): 1016–1032.
- [18] Zhang, Y. (2014) "Deformation-strength characteristics of unsaturated granular subbase course material under monotonic and cyclic loading", Phd Tesis Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- [19] Darendeli, M., 2001. *Development of a New Family of Normalized Moduli Reduction and Material Damping Curves*. Austin, TX, USA: University of Texas at Austin.
- [20] Kokusho, T., Yoshida, Y. y Esashi, Y., 1982. Dynamic Properties os Soft Clay for Wide Strain Range. *Soils and Foundations*, 22(4), pp. 1-18.
- [21] Qian, X., Gray, D. y Woods, R. (1991). "Resonant column tests on patially saturated sands", *Geotechnical Testing Journal ASTM*, September 1991, Vol. 14, N° 3, pp. 266-275.
- [22] Romo, M. (1995). *Clay Behavior, Ground Response and Soil-Structure Interaction Studies in Mexico City*. In *Proceedings of the 3th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering y Soil Dynamics*, 2-7 April 1995, St. Louis, Missouri, USA, II, 1039-1051.
- [23] Hardin, B., y Black, W. (1968). Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 353–369.
- [24] Hardin, B. (1978). *The Nature of Stress Stain Behavior of Soils*. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE*, 3-90.
- [25] Khosravi, A., y McCartney, J. (2009). Impact of Stress State on the Dynamic Shear Modulus of Unsaturated, Compacted Soils during Drying. *Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils*, Newcastle, Australia, 1-6.
- [26] Fernández-Lavín, A., y Flores, O. (2016). Comportamiento estático y pos cíclico de jales (relaves) mineros no saturados. *Memorias XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Publicación SMIG. Mérida, Yucatán, México.