Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges N.P. López-Acosta et al. (Eds.) © 2019 The authors and IOS Press. This article is published online with Open Access by IOS Press and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License 4.0 (CC BY-NC 4.0). doi:10.3233/STAL190034

Módulo cortante y amortiguamiento de relaves mineros no saturados

Alfonso FERNÁNDEZ^{a,1} y Osvaldo FLORES^a ^a Instituto de Ingeniería – UNAM, Coordinación de Geotecnia

Resumen. Los depósitos mineros son estructuras elaboradas con materiales no utilizables en ese momento por la industria minera. En este artículo se estudia la influencia de las fuerzas capilares, compacidad relativa y esfuerzo confinante iniciales en las propiedades de resistencia de relaves mineros no saturados ante cargas dinámicas. Mediante la técnica de apisonado fueron elaboradas probetas con relaves mineros y empleando un equipo de columna resonante se efectuaron pruebas mediante la técnica de barrido de frecuencia para determinar el módulo de resistencia al esfuerzo cortante ($G_{máx}$) y el amortiguamiento estos materiales complementado esta información con pruebas efectuadas en una cámara triaxial cíclica. En estado seco se obtuvieron los valores de $G_{máx}$ más altos, disminuyendo conforme se incrementó el grado de saturación hasta un 16.6%, a partir de este punto las propiedades mecánicas no cambiaron significativamente aún con un incremento de la saturación. Se propone un modelo que relaciona la variación del $G_{máx}$ con respecto al grado de saturación, relación de vacíos y esfuerzo de confinamiento para los relaves no saturados estudiados.

Palabras Clave. Relaves mineros, no saturado, columna resonante, cámara triaxial cíclica, rigidez al cortante, amortiguamiento.

1. Introducción

En la naturaleza, un suelo puede estar conformado por la unión de diferentes tipos de partículas que pueden variar una de otra principalmente por su composición mineralógica, número, tamaño y forma. Las combinaciones de estos factores aunado al estado de esfuerzos actuantes gobiernan el comportamiento esfuerzo-deformación de una masa de suelo. Por otro lado, la composición mineralógica de estas partículas ayuda a entender el origen de los fragmentos, mientras que la cantidad, el tamaño y la forma de las partículas indican los procesos mediante los cuales estas partículas fueron transportados. Por último, la microestructura final del estrato conformado será definido por la manera en cómo fueron depositadas estas partículas.

Para el caso de suelos originados por acciones antropogénicas como son los relaves mineros, su mineralogía será gobernada por el tipo de minerales remanentes no útiles en ese momento. Por otro lado, la cantidad, el tamaño y la forma de las partículas dependerán del tipo de molienda a la que fue sometida la roca madre de origen. Este procedimiento permite obtener a la industria minera una determinada superficie específica para optimizar los procesos de aprovechamiento y extraer los minerales

¹ Correspondencia del autor: Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, CDMX, C.P. 04510; E-mail: afernandezl@iingen.unam.mx

deseados con los menores costos. Finalmente, la estructura de estos depósitos será influenciada por la técnica de depósito empleada y a la historia de esfuerzos.

Generalmente la disposición de los relaves mineros hasta su ubicación final es efectuada de manera líquida, es decir, estos materiales son conducidos en forma de lodos por medio de un sistema de tuberías y bombas de impulsión [1] o también pueden ser transportados empleando maquinaria pesada cuando son tratados previamente con filtros o prensas con el fin de disminuir su contenido de agua, convirtiéndolos en materiales cuasi secos [2]. La selección del mejor método de disposición dependerá de un análisis previo de las características propias de los relaves mineros, de los ciclos de disposición, del clima, de las condiciones sísmicas del sector, así como de los propios parámetros considerados para el diseño de la estructura de contención y emplazamiento de la obra.

Este tipo de estructuras de contención se encuentran influenciados por acciones externas resultantes de su operación, interacción con la atmósfera y el material de cimentación. Cuando este tipo de materiales son transportados o dispuestos en forma de lodos, durante la operación del almacenamiento normalmente se presentará una zona saturada que se encuentra bajo la línea superior de corriente y otra no saturada sobre ella [3]. En las zonas no saturadas los efectos de esfuerzos capilares juegan un factor muy importante en el contacto entre partículas, tendiendo a incrementar la resistencia del material y reducir la compresibilidad, propiedades que pueden ser rápidamente disminuidas si el material nuevamente se satura.

Debido a que en la literatura disponible aún es reducida la información referente al estudio de relaves mineros no saturados, el objeto de este estudio es investigar la variación del módulo de rigidez al cortante y del amortiguamiento ante solicitaciones dinámicas en probetas elaboradas con relaves mineros no saturados, variando su grado de saturación, relación de vacíos y esfuerzo confinante.

2. Probetas y procedimiento experimental

2.1. Material empleado

Se emplearon relaves mineros provenientes del Distrito Minero Topia, producto de la trituración y procesamiento de material pétreo para la explotación de plata, plomo y zinc. Las propiedades granulométricas de este suelo fueron obtenidas mediante tamizado por vía húmeda; la porción en peso de material fino (<0.075 mm) fue 11.6%, arena (entre 0.075 y 4.75 mm) del 88.4%, no presentando tamaños tipo gravas. El tamaño medio de partículas (D₅₀) fue de 0.22 mm, coeficiente de uniformidad C_u (=D₆₀/D₁₀) igual a 4.00, y el coeficiente de curvatura C_c (=D₃₀²/(D₁₀ D₆₀)) 1.47. Adicionalmente, la gravedad específica fue de 2.91. Estos materiales según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) se clasifican como arenas mal gradadas-limosas (SP-SM).

2.2. Procedimiento para la preparación de probetas

Con el fin de conocer el comportamiento de los relaves mineros ante la acción de compactación por apisonado, se efectuaron pruebas empleando un molde partido metálico con un diámetro de 3.5 cm, altura 8.5 cm, y un pisón con pesos variables entre 100 y 3000 g. Las muestras fueron confeccionadas en 10 capas apisonadas 12 veces cada una. Este proceso se repitió variando los contenidos de agua entre 0 y 20%. En la Figura 1

se puede apreciar que las condiciones más sueltas del material (máxima relación de vacíos, e_{max}) se lograron en condiciones húmedas, mientras que las más densas (mínima relación de vacíos, e_{min}) fue lograda en condiciones secas. Durante la densificación, es más fácil el acomodo de partículas en un medio seco dentro de la microestructura, privilegiando la orientación y acomodo entre partículas. Por otro lado, cuando las partículas se encuentran húmedas los esfuerzos capilares tratan de impedir el reacomodo de las partículas [4].



Figura 1. Pruebas de compactación, influencia del contenido de agua en la relación de vacíos.

Los valores de e_{max} y e_{min} obtenidos de las pruebas de compactación fueron 1,32 y 0.67, respectivamente. Los cambios volumétricos más importantes se presentaron para pesos de pisón menores a 1000 g, sobrepasando este valor no se produce mayor disminución de los vacíos. Este mismo comportamiento se observó para diferentes contenidos de agua, incrementando el peso del pisón a partir de 1000 g se obtuvieron relaciones de vacío similares. El intervalo de validez de este método de compactación fue definido previamente por Fernández y Flores [5].

2.3. Programa experimental y equipo empleado.

El programa experimental buscó conocer la influencia de las fuerzas capilares en el comportamiento de los relaves mineros ante la acción de cargas dinámicas, al variar el grado de saturación desde 0 a 76.4%, manteniendo una compacidad relativa similar para cada una de las muestras. Por otro lado, para conocer la influencia de la variación de la compacidad relativa en el comportamiento de estos materiales fueron seleccionadas muestras con diferentes compacidades relativas (17 a 86%) confeccionadas con valores muy cercanos de grado de saturación. Las probetas constituidas fueron ensayadas con diferentes presiones de confinamiento isótropas de 0.2, 0.4, 0.8 y 1.2 kg/cm². Estos valores fueron seleccionados con el fin de no perturbar las propiedades mecánicas de las probetas, evitando la difusión de aire a través de la membrana al momento de aplicar este esfuerzo.

En una primera etapa, utilizando probetas elaboradas con el procedimiento antes descrito, en la columna resonante se llevaron a cabo pruebas empleando el método de barrido de frecuencias para encontrar el módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento de las probetas en un rango de muy pequeñas a pequeñas deformaciones angulares.

En la segunda etapa de la investigación y utilizando probetas idénticas a las ensayadas en la columna resonante, en esta etapa fue utilizada una cámara triaxial cíclica

para aplicar cargas dinámicas de 20 repeticiones, con frecuencia de 1 Hz, variando la amplitud de deformación hasta fallar el espécimen de suelo, con el fin de observar el comportamiento del módulo de rigidez y amortiguamiento a grandes distorsiones angulares. Las probetas fueron sometidas a la acción de esfuerzos isótropos de 0.4, 0.8 y 1.2 kg/cm².

3. Presentación y análisis de resultados

3.1. Evaluación de las propiedades dinámicas de los relaves no saturados.

En la Figura 2 se observa que, para pequeñas deformaciones angulares el módulo de rigidez al corte decrece conforme se disminuye la compacidad relativa de las probetas elaboradas con un grado de saturación similar y sometidas a un mismo esfuerzo de confinamiento. Este comportamiento se debe a que conforme disminuye la compacidad relativa, el contacto entre partículas es mucho menor debido al incremento de los vacíos dentro del suelo. Para el caso del $G_{máx}$ el valor obtenido en las condiciones más densas fue de 1153 kg/cm² y para las condiciones más sueltas se obtuvo un valor de 517 kg/cm². Por otro lado, para distorsiones angulares grandes no se evidencian diferencias significativas del módulo de rigidez con respecto a la variación de la compacidad relativa de las probetas.

En esta misma Figura 2, se puede apreciar que el amortiguamiento no sufrió mayores cambios para los diferentes valores de compacidad relativa en las probetas utilizadas. El amortiguamiento máximo varió ligeramente entre el 14 y el 15% independientemente del tamaño de la distorsión angular aplicada a la probeta y del grado de saturación inicial de la probeta.



Figura 2. Influencia de la compacidad relativa en el G (a) y amortiguamiento (b) para un grado de saturación del 17.02 (Esfuerzo de confinamiento de 0.8 kg/cm²).

En la Figura 3 se aprecia que el módulo de rigidez al cortante en el rango de pequeñas deformaciones angulares disminuye conforme el grado de saturación se incrementa. Estas probetas fueron elaboradas manteniendo una compacidad relativa similar y ensayadas para un mismo esfuerzo de confinamiento. En este rango de deformación, los valores más altos del módulo de rigidez al cortante fueron obtenidos en la muestra elaborada con el material completamente seco (*Sr*=0 %). Adicionalmente, es importante recordar que en estas condiciones fue alcanzada la condición más densa en los ensayos de compactación por apisonado (e_{min}).

Conforme el grado de saturación fue incrementándose hasta llegar al 16.6%, el módulo de rigidez al cortante disminuyó considerablemente. Cuando el grado de saturación de la probeta fue incrementado hasta el 32.9 %, la rigidez al cortante de los relaves mineros no experimentó un cambio significativo. Sin embargo, el módulo de rigidez al cortante aumentó ligeramente cuando el grado de saturación de la probeta fue del 75.5%. El comportamiento del módulo de rigidez al cortante a grandes deformaciones no fue influenciado mayormente por el cambio del grado de saturación de las probetas analizadas. El $G_{máx}$ varió entre 1487 kg/cm² para la condición seca y 824 kg/cm² que fue obtenido para los grados de saturación de 16.6 y 32.4%.



Figura 3. Influencia del grado de saturación en el G bajo la acción de un esfuerzo de confinamiento de 0.8 kg/cm², (a) y amortiguamiento (b) para una compacidad relativa del 80.7%.

Por otro lado, en esta misma Figura 3 es posible observar que el amortiguamiento obtenido en las probetas de relaves mineros no sufre mayores variaciones debido a un cambio en el grado de saturación. Este comportamiento fue constante, independientemente del rango de deformación angular a la que fue sometida la probeta obteniéndose un valor del amortiguamiento máximo cercano al 15%.



Figura 4. Influencia del esfuerzo de confinamiento en el G y amortiguamiento (Sr= 17.02% y Dr=86.3%).

Con el fin de poder conocer la influencia del estado de esfuerzos en el comportamiento dinámico de los relaves no saturados estudiados, fueron elaboradas probetas con grados de saturación y compacidad relativa similares. Estas probetas en la etapa de ensayo fueron sometidas a esfuerzos de confinamiento isótropos diferentes. En la Figura 4 se observa que en el rango de pequeñas deformaciones angulares el módulo de rigidez al cortante se incrementa conforme el esfuerzo de confinamiento es incrementado. Este comportamiento es más evidente para distorsiones angulares

menores a 1×10^{-3} mm/mm. Por otro lado, en el rango de grandes deformaciones angulares no se evidenciaron cambios significativos del módulo de rigidez al cortante. Los valores del G_{máx} variaron entre 613 kg/cm² para un esfuerzo de confinamiento de 1.2 kg/cm² y 337 kg/cm² cuando un esfuerzo de confinamiento de 0.4 kg/cm².

Además, en la Figura 4 también se observa que los valores del amortiguamiento máximo obtenidos en las probetas de relaves mineros no saturadas ante cargas cíclicas fueron del orden del 15%. Este valor no varió independientemente del esfuerzo de confinamiento isótropo aplicado.

3.2. Relación entre el G_{max} y el grado de saturación, la relación de vacíos y el esfuerzo de confinamiento.

En la literatura, muchos autores han trabajado en la obtención de una expresión que permita estimar el $G_{máx}$ en diferentes suelos para condiciones secas o saturadas [6, 7]. Una relación funcional fue propuesta por Hardin y Black [8] relacionando el $G_{máx}$ con el esfuerzo efectivo medio (σ_m '), pre-consolidación (OCR) y plasticidad del material (k), conforme la expresión:

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

donde, A es un parámetro de forma, F(e) relaciona la relación de vacíos y n parámetro de forma relacionado con el esfuerzo efectivo medio. Por otro lado, Hardin [9] definió la denominada función de relación de vacíos, F(e), como:

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

Tradicionalmente estas expresiones para estimar el $G_{máx}$ han sido estimadas para suelos saturadas. Con el fin de conocer el comportamiento del $G_{máx}$ en suelos no saturados, Khosravi y McCatney [10] revisaron la influencia del módulo de rigidez a pequeñas deformaciones con respecto al esfuerzo efectivo publicados previamente. Estos investigadores observaron la dependencia que presentan estos suelos ante el cambio del grado de saturación, proponiendo una expresión empírica para predecir el comportamiento del $G_{máx}$ respecto a las curvas de retención de agua, de la siguiente manera:

$$G_{max} = A \frac{Pa^n}{0.3 + 0.7e^2} \left\{ \frac{\sigma_m - u_a}{Pa} + \left(\frac{\psi_b}{Pa} + 1 \right) ln \left[\frac{\psi}{Pa} + 1 \right] \right\}^n$$
(3)

donde, Pa es la presión atmosférica, ψ es la succión mátrica y ψ_b succión por entrada de aire. El argumento para este modelo se basa en la idea de que la succión mátrica es igual al esfuerzo efectivo, sólo para valores de la succión menores que la succión por entrada de aire.

En la presente investigación, las propiedades dinámicas del suelo investigado fueron obtenidas variando el esfuerzo de confinamiento, relación de vacíos, grado de saturación iniciales y no fueron medidas las presiones de aire y agua durante la ejecución de los ensayos. Analizando el comportamiento de los relaves estudiados, se observa que el valor del $G_{máx}$ varió inversamente al cambio de la relación de vacíos, por esta razón se adoptó el uso del parámetro F(e), anteriormente explicado. De los resultados experimentales

también se observó que el $G_{máx}$ incrementó cuando se produjo un aumento del esfuerzo de confinamiento, así como también que el $G_{máx}$ disminuyó conforme aumentó el grado de saturación hasta un 16.6% y a partir de este punto no varía significativamente su valor. Considerando este comportamiento, se plantea una propuesta de expresión algebraica para calcular el $G_{máx}$ con respecto a la relación de vacíos, esfuerzo confinante y grado de saturación de la siguiente manera:

$$G_{max} = AF(e) \left[\frac{\sigma_c}{\ln(Sr)} \right]^n - b \tag{4}$$

donde, *A* y *n* son parámetros adimensionales de forma, *F(e)* función de la relación de vacíos, σ_c esfuerzo de confinamiento (kg/cm²), *Sr* el grado de saturación (%) y *b* factor de corrección. Una vez efectuado un análisis de ajuste gráfico de los valores obtenidos experimentalmente y de los estimados con la Ec. (4), se obtuvieron los siguientes parámetros: *A*=1830, *n*=0.35 y *b*=500.

La Figura 5 muestra una comparativa entre los valores experimentales y los teóricos obtenidos con la Ec. (4) del $G_{máx}$, observándose una gran similitud entre ellos. Debido a que en la ec.4 el parámetro del grado de saturación se ubicó como denominador no fue posible obtener los valores teóricos para las muestras secas.



Figura 5. Comparación de los datos experimentales y valores calculados de G_{max} , en función del grado de saturación (a) y relación de vacíos (b).

4. Conclusiones

El estudio del comportamiento dinámico de los relaves mineros no saturados sigue creciendo en interés, debido a la disposición final de estos materiales por medios mecánicos y al uso de filtros o prensas utilizadas para disminuir el contenido de agua de los materiales excedentes de la industria minera.

Los valores más altos del módulo de rigidez al cortante fueron encontrados para un grado de saturación igual a cero. De manera general, conforme se incrementa el grado de saturación inicial hasta un 16.6% se produce un brusco decremento de la resistencia al esfuerzo cortante y a partir de este punto un incremento en el grado de saturación no produce cambios significativos en las propiedades mecánicas del material.

Un incremento en la densidad relativa inicial de las probetas o del esfuerzo de confinamiento genera un incremento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de la probeta, este comportamiento es principalmente observado en el rango de muy pequeñas deformaciones angulares.

El comportamiento normalizado, tanto en pruebas dinámicas del material estudiado muestras una dependencia de la relación de vacíos, grado de saturación y esfuerzo de confinamiento inicial a la que son sometidas las probetas. Este comportamiento permitió proponer una expresión para el cálculo del G_{máx}. Es importante recalcar que seguramente la otra variable a considerar sería el porcentaje de finos, que en este estudio no se analiza, debido a que se trabajó con un material nada más.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y al Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM). Así como también a la empresa Great Panther y al Ing. Javier M. Ramírez Vargas† por la donación y envío de los relaves mineros con los que se realizó este trabajo.

Referencias

- [1] International Committee on Large Dams, ICOLD (1996). Bulletin 106: A Guide to Tailing Dams and Impoundments; Design, construction, use and rehabilitation.
- [2] Davies M. (2011). "Filtered Dry Stacked Tailings The Fundamentals". Proceedings Tailings and Mine Waste - Vancouver. https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/59368/items/1.0107683
- [3] Zandarín M., Oldecop L., Rodríguez R., y Zabala, F. (2009). "The role of capillary water in the stability of tailing dams", *Engineering geology*, Elvisier (105): 108-118.
- [4] Ladd, R. (1977). "Specimen preparation and cyclic stability of sands", J. of the Geot. Eng. Div., ASCE, (103): 535-547.
- [5] Fernández 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.
- [6] Hardin B.O. y Black W.L. (1968). "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, (94): 353–369.
- [7] Kokusho T. (1980). "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range", *Soils and Found*. (20): 45-60.
- [8] Hardin, B.O. and Black, W.L. (1969). "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay; Closure." J. of the Soil Mech. and Foundations Div., ASCE, (95): 1531–1537.
- [9] Hardin, B.O. (1978). "The Nature of Stress Stain Behavior of Soils." *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE, (1): 3–90.
- [10] 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):1-6.
- [11]Kramer S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prince Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, USA, 648 pp.
- [12] Fernández A. (2016). "Propiedades dinámicas de jales mineros no saturados". Tesis de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.