

Estudio del comportamiento monotónico no drenado de relaves de aluminio

Brahian ROMAN^{a,1}

^a Universidad de Tokio, Japón

Resumen. Se han reportado numerosos casos de falla por flujo en presas de relaves desencadenadas por licuación ya sea dinámica como estática en los últimos 20 años. Los relaves de Aluminio son utilizados actualmente como material de construcción de presas por lo que se debe estudiar directamente su susceptibilidad y resistencia a la licuación. Una manera de evaluar la susceptibilidad a la licuación de suelos granulares es aplicando ensayos de laboratorio en condición no drenada y utilizando la base teórica de la Mecánica de Suelos del Estado Crítico lo cual permite además obtener valores de la resistencia residual post-licuación. Este artículo resume la caracterización geotécnica de relaves de Aluminio aplicando ensayos de compresión triaxial no drenado a diferentes niveles de densidad y esfuerzo de confinamiento. Además, con el objetivo de evaluar los efectos de mineralogía y plasticidad, se preparó una mezcla de arenas y limos no plásticos (Aluminio simulado) cuya gradación final coincide con la gradación de la fracción gruesa del Aluminio. Los resultados permiten concluir que la respuesta del tipo flujo con deformación limitada (cuasi estado crítico) es predominante en la región contractiva del Aluminio. Se obtuvo también la línea de estado crítico y la resistencia no drenada residual los cuales pueden ser utilizado en proyectos de ingeniería.

Palabras Clave. Aluminio, monotónico, estado crítico, licuación por flujo.

1. Introducción

La minería se define como la extracción de minerales valiosos (Cobre, Hierro, Aluminio) de la tierra. Esta industria desempeña un papel importante en la economía global, ya que ayuda a mejorar el crecimiento económico. Solo en la última década, se invirtieron alrededor de 9 billones de dólares a nivel mundial en minería (World Bank Mining Group Department, 2015). La minería implica el diseño, la construcción y el mantenimiento de varias estructuras geotécnicas, como tajos abiertos, depósitos de desmonte, pilas de lixiviación y presas de relaves. Dadas sus grandes dimensiones y altos niveles de toxicidad, es importante garantizar la seguridad y la capacidad de servicio de estas estructuras para evitar pérdidas económicas y humanas, así como severos daños ambientales. Sin embargo, se han reportado muchos casos de fallas por flujo en presas de relaves desencadenadas por licuación tanto estática como dinámica en los últimos 20 años [1]. Davies [2] resumió varios casos de fallas por flujo en presas de relaves, señalando la necesidad de evitar que los relaves se comporten de manera contractiva en cualquier modo de carga cortante, incluso en países que no son propensos a sismos de alta magnitud. Los relaves de Aluminio son el subproducto de la extracción de Bauxita

¹ Corresponding Author, Universidad de Tokio, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japón; E-mail: broman@geot.t.u-tokyo.ac.jp.

y se han utilizado como material de construcción. Recientemente, se construyó una presa de relaves en los Emiratos Árabes Unidos utilizando relaves de aluminio.

Por lo tanto, es de suma importancia estudiar la susceptibilidad del Aluminio a las fallas por flujo para usarlo adecuadamente como material de construcción. Jefferies y Been [3] manifiestan que la resistencia cortante post-licuación controla la susceptibilidad a la falla por flujo. La estimación de esta resistencia cortante, así como las propiedades de estado (densidad y esfuerzo de confinamiento efectivo) dentro de las cuales el suelo es contractivo, se pueden estudiar mediante la evaluación del comportamiento monotónico no drenado a grandes deformaciones utilizando los conceptos de relación de vacío crítico y estado último de deformación propuesto por Casagrande [4], Poulos [5], Castro [6] e Ishihara [7]. A pesar de ser de naturaleza estática, este último enfoque ha contribuido en gran medida a mejorar la comprensión del fenómeno de licuación inducida dinámicamente al identificar las condiciones de esfuerzo efectivas en las que se inician los fenómenos de licuación [8]. Si bien hay estudios que caracterizan las propiedades geotécnicas de los relaves de Aluminio, existen una falta de información sobre su comportamiento monotónico con el objetivo de estudiar su susceptibilidad a la licuación por flujo y su resistencia al corte post-licuación. Este documento presenta el resultado de un conjunto de ensayos triaxiales monotónicos no drenados con medición de presión de poros en relaves de Aluminio en varias condiciones de densidad y esfuerzo de confinamiento efectivo. Se graficó también la línea de estado crítico y se estimó la resistencia al cortante residual para el análisis de estabilidad post-sismo.

Vale la pena mencionar que los relaves de aluminio tienen una mineralogía y una forma de partículas diferentes a la mayoría de los suelos "académicos" que se usan normalmente en la investigación (e.g. arenas de Toyoura, Ottawa, Silica, entre otros) y, por lo tanto, es necesario estudiar su respuesta al corte directamente. Por esta razón se realizó una mezcla de diversos tipos de arena y limo de Sílice hasta obtener una gradación similar a la gradación de la fracción gruesa de los relaves de Aluminio para así evaluar los efectos de forma de partículas, mineralogía y plasticidad.

2. Caracterización Geotécnica

Los relaves de Aluminio son una arena limosa (SM) bien graduada de baja plasticidad (IP = 10.9). Sus minerales más abundantes son de naturaleza metálica (Diáspora, Bohemita) debido a su formación geológica (depósitos lateríticos), aunque existe cierta cantidad de minerales arcillosos, lo que explica su plasticidad. La forma predominante de sus partículas es subangular. Al tacto, su textura se siente suave. Su gravedad específica es (2.642). A partir de la prueba de Proctor Modificado, la densidad seca máxima obtenida es de 1,70 gr / cm³ con un contenido óptimo de humedad del 19,2%.

Se mezclaron 6 tipos de arena y limo de Sílice para obtener una gradación similar a la gradación de la fracción gruesa de los relaves de Aluminio. La Figura 1 muestra la granulometría de ambos suelos, se puede observar que la fracción de finos difiere considerablemente. La fracción fina del Aluminio están bien graduada y presentan partículas de tamaño arcilla, mientras que la mezcla (Aluminio Simulado) predominantemente limosa y mal graduada.

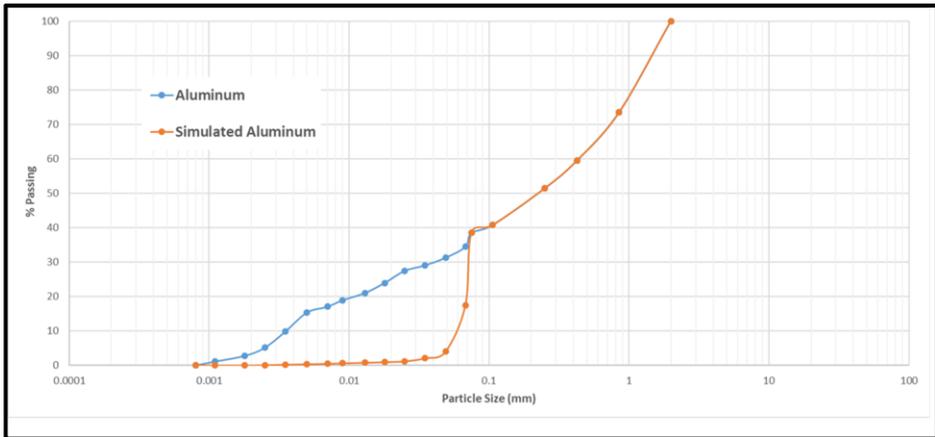


Figura 1. Granulometría del aluminio y aluminio simulado.

3. Comportamiento Monotónico no Drenado

Se realizó 30 ensayos de compresión triaxial monotónicos no drenados en relaves de Aluminio y Aluminio Simulado completamente saturados. El método de preparación de la muestra fue el de apisonamiento húmedo (moist-tamping) ya que la fábrica se asemeja más para estructuras de tierra como terraplenes y presas. La relación de vacíos inicial varió de 0.727 a 1.329 correspondientes a grados de compactación de 90.0% y 66.7% de la densidad seca máxima obtenida por la prueba Proctor modificada (GC), respectivamente. La proporción de vacíos después de la consolidación osciló entre 0.631 (95.3% de GC) y 1.322 (66.9% de GC).

Un suelo granular saturado muestra 3 tipos de comportamiento cuando se somete a cargas monotónicas en condiciones no drenadas [7]: tipo sin flujo (dilatante), tipo de flujo completo (Contractivo o estado crítico) o flujo con deformación limitada (cuasi estado crítico).

3.1. Resultados para Relaves de Aluminio

En la presente investigación, los resultados de laboratorio mostraron respuestas de tipo sin flujo (dilatante) y flujo con deformación limitada (estado cuasi estable) para los relaves de Aluminio lo cual indica que estos relaves son susceptibles a una pérdida súbita de resistencia si son sometidas a cargas en condición no drenada (licuación por flujo) a diferencia de otros suelos residuales de formación laterítica y por lo tanto se deben llevar a cabo análisis de estabilidad post-sismo durante el diseño. No fue posible obtener el comportamiento del tipo de flujo completo incluso para el estado de densidad más suelto posible del método de preparación de compactación húmeda y un esfuerzo de confinamiento efectivo muy bajo. Estos resultados son similares a los datos proporcionados por Verdugo (1992) en la arena de Toyoura que no muestra una respuesta de tipo de flujo, incluso para el estado más suelto obtenido del método de apisonamiento húmedo. En cuanto a parámetros de resistencia. El Aluminio presenta un ángulo de fricción efectivo de 37.6° y un valor de intercepto cohesivo de 10.6 kPa.

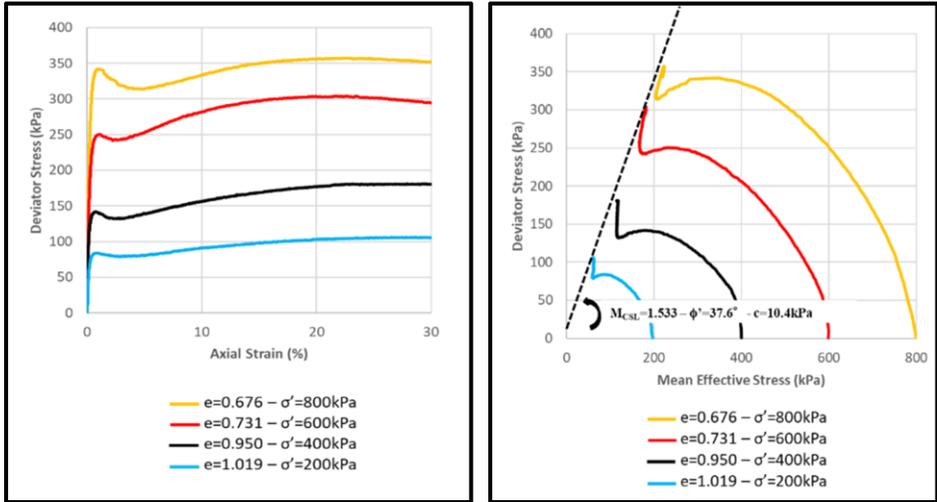
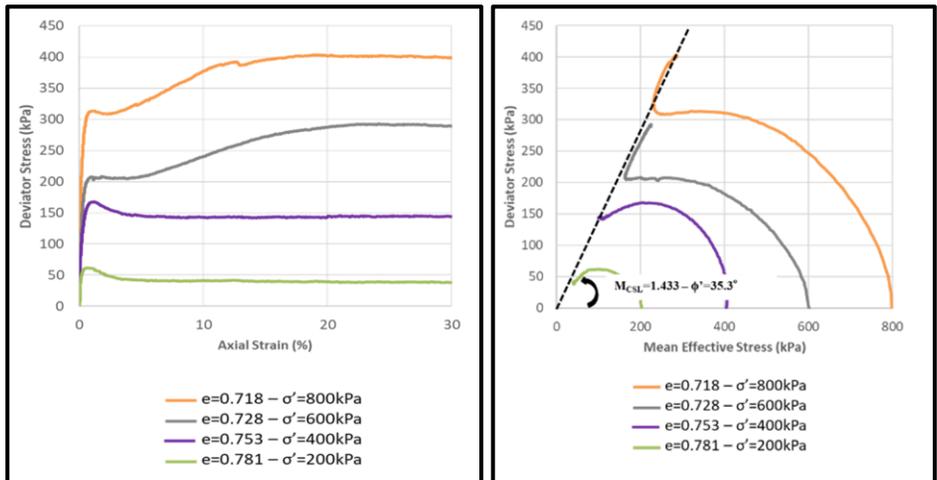


Figura 2. Comportamiento monotónico no drenado de relaves de aluminio.

3.2. Resultados para Aluminio Simulado

Para el Aluminio Simulado, fue posible obtener un comportamiento de tipo de flujo completo (estado crítico) para esfuerzos de confinamiento efectivo de hasta 200kPa. Las pruebas restantes mostraron un tipo de flujo con deformación limitada (cuasi estado crítico). Se plantea la hipótesis de que los relaves de aluminio, debido a su plasticidad, no muestran un comportamiento de tipo de flujo. El Aluminio simulado presenta un ángulo de fricción efectiva menor (35.3°) que los relaves de Aluminio y cohesión nula.



Figuras 3. Comportamiento monotónico no drenado de aluminio simulado.

3.3. Línea de Estado Último

El estado último de deformación o estado crítico fue definido por Poulos [5] como:

"El estado crítico es el estado de deformación para cualquier masa de partículas en la que la masa se deforma continuamente a volumen constante, esfuerzo efectivo normal constante, esfuerzo de corte y velocidad constantes"

En el presenta artículo, se asume la existencia de una línea de estado crítico (SSL) única para los suelos. Se observó que el estado crítico se obtiene al 30% de deformación axial. Los resultados de los ensayos se graficaron en el plano índice de vacíos (e) vs log (p'), diferenciando aquellos que muestran un comportamiento dilatante de aquellos con comportamiento contractivo (Figura 4). Se observa que los relaves de Aluminio son menos susceptibles a licuación por flujo que el Aluminio Simulado hasta p'=400 kPa aproximadamente.

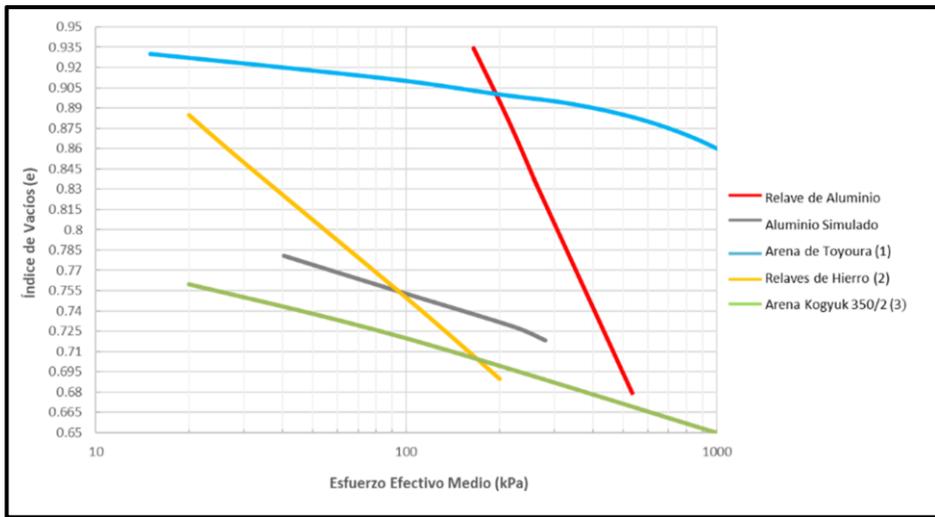


Figura 4. Líneas de estado crítico.

4. Resistencia Residual Post-Licuación

La resistencia al corte post-licuación se puede determinar como la resistencia no drenada movilizadora en el cuasi estado crítico (cee) y se calcula aplicando la siguiente expresión [7]:

$$\frac{S_u}{\sigma_0} = \frac{S_{cee}}{\sigma_0} = \frac{q_s}{2} * \frac{\cos \varphi_s}{\sigma_0} \tag{1}$$

donde φ_s y q_s son el ángulo de fricción movilizadora y el esfuerzo desviador en el cuasi estado crítico respectivamente. Al aplicar esta expresión a los resultados de laboratorio, es posible obtener los siguientes resultados (Figura 5):

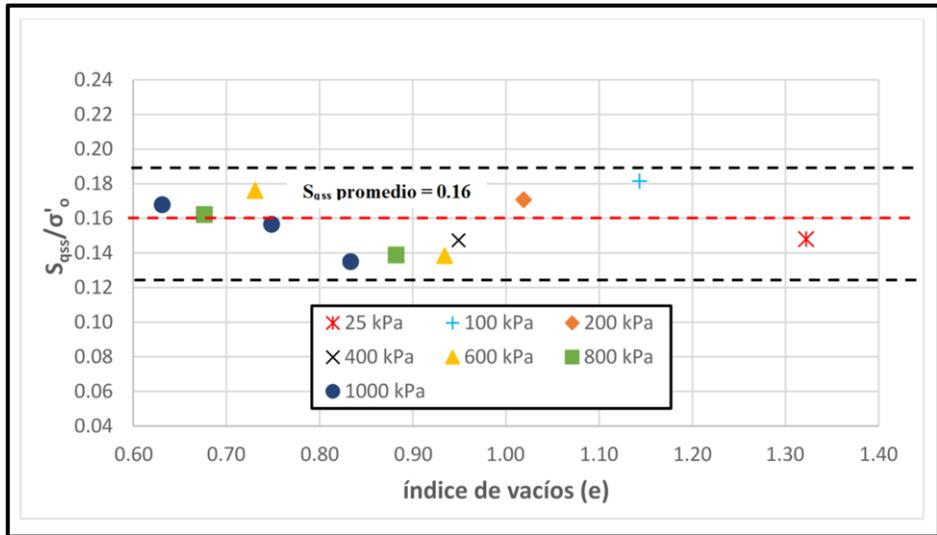


Figura 5. Resistencia residual normalizada vs índice de vacíos.

A pesar de que muchos suelos no tienen una relación de resistencia cortante residual única porque no presentan una línea de consolidación isotrópica única [8], los resultados obtenidos muestran poca dispersión y, por lo tanto, se puede establecer un valor promedio.

$$\frac{S_{qss}}{\sigma'_0} = 0.16$$

Olson y Stark [9] recopilaron valores de resistencia residual obtenidos mediante ensayos de laboratorio y por retroanálisis de casos de falla por flujo reales, y concluyeron que los valores normalizados de resistencia residual obtenidos en laboratorio oscilan entre 0.02 y 0.22, mientras que los resultados obtenidos por retroanálisis oscilan entre 0.05 y 0.12. El valor obtenido para los relaves de Aluminio se encuentra dentro del primer rango, aunque es más alto que los rangos encontrados con retroanálisis.

La tabla 1 muestra el valor normalizado de relaves de Aluminio y materiales similares. Para la arena limosa de la presa San Fernando [10], la arena limosa de la presa Duncan [11] y los relaves finos de Cobre [12], la resistencia residual se definió como la resistencia en el estado último porque las muestras mostraron un comportamiento tipo flujo completo. Por otro lado, el limo arenoso “Lagunillas” y la arena limosa “Tía Juana” [7] mostraron un tipo de flujo con deformación limitada y, por lo tanto, se calculó la resistencia al corte en el cuasi estado crítico. Esta es la razón por la cual la resistencia al corte depende del método de preparación de la muestra (efectos de fábrica), en el cuasi estado crítico estable los efectos de fábrica aún no son erradicados y por lo tanto el valor de la resistencia no es único. Se puede observar que la resistencia

Tabla 1. Resistencia Residual no Drenada Normalizada para materiales similares.

Tipo de Suelo	S_{us}/σ'_o (en el estado crítico)	S_{qss}/σ'_o (en el cuasi estado crítico)
Relaves de Aluminio – Apisonamiento Húmedo	-	0.16
Aluminio Simulado – Apisonamiento Húmedo	-	0.10
Arena Limosa de la Presa San Fernando¹	0.12	-
Arena Limosa de la presa Duncan²	0.21	-
Limo arenoso Lagunillas - Sedimentación con agua³	-	0.134
Limo arenoso Lagunillas - Deposición Seca³	-	0.086
Arena Limosa Tía Juana - Sedimentación con agua³	-	0.181
Arena Limosa Tía Juana - Deposición Seca³	-	0.146
Relaves Finos de Cobre⁴	0.07	-

Nota: ¹ Baziar y Dobry [10]; ² Pillai y Salgado [11]; ³ Ishihara [7]; ⁴ Castro y Troncoso [12].

De acuerdo con la revisión de la literatura, la resistencia obtenida en el laboratorio tiende a no ser conservadora debido a los efectos de la redistribución de la relación de vacíos, trayectoria de esfuerzos más complejas y las condiciones de drenaje parcialmente drenada [13] que no se modelan en los ensayos de laboratorio. Además, el valor obtenido para los relaves de aluminio se obtuvo en el cuasi estado crítico que depende de la preparación de la muestra, por lo que este valor no es único. Por lo tanto, se sugiere aplicar un 50% del factor de seguridad, definiendo la relación como 0.08 para aplicaciones de ingeniería.

5. Conclusiones

- Los relaves de Aluminio presentan susceptibilidad a perder súbitamente su resistencia al ser sometidos a cargas en condición no drenada (licuación por flujo) a diferencia de otros suelos residuales de formación laterítica por lo que en el diseño de presas de relave de Aluminio se debe considerar el análisis post-sismo.
- La respuesta del tipo cuasi estado crítico (tipo de flujo con deformación limitada) es predominante en los relaves de aluminio, incluso en el nivel más bajo de densidad por el método de apisonamiento húmedo, mientras que los Aluminio Simulado (no plástico) muestran un comportamiento de estado estable (flujo completo). Se plantea la hipótesis de que el nivel de plasticidad desempeña un papel en las diferencias de respuesta obtenidas de los dos tipos de suelos.
- La resistencia al corte no drenado movilizadas en el estado cuasi estado crítico se definió como la resistencia residual. Esta muestra valores que van desde 3.7 kPa hasta 167.9 kPa.

- Los valores mencionados anteriormente se normalizaron con respecto a la presión efectiva de confinamiento y se representaron en función de su relación de vacíos, mostrando poca dispersión, lo que significa que, a diferencia de otros suelos granulares, los relaves de aluminio tienen una proporción única
- El promedio de resistencia al corte no drenado normalizado se definió como 0.16, que se encuentra dentro de la base de datos de valores normalizados obtenidos en ensayos de laboratorio (0.02-0.22), aunque es un poco más alto que las relaciones obtenidas utilizando retroanálisis de fallas por flujo reales (0.05-0.12).
- A pesar de ser susceptible a licuación por flujo, los relaves de Aluminio son menos vulnerables que el Aluminio simulado y poseen valores de resistencia residual post-licuación mayores debido al contenido de finos plásticos. Esto además se evidencia en que no se pudo obtener el comportamiento de flujo completo (estado crítico) en los relaves de Aluminio.
- La relación promedio corresponde al cuasi estado crítico en el que los efectos de fábrica inicial aún no se borran completamente. Por lo tanto, este valor puede ser diferente si los ensayos se realizan utilizando otros métodos de preparación de la muestra.
- Dado que las resistencias al corte residual o post-licuación basadas en ensayos de laboratorio no son conservadoras, se sugiere aplicar un factor de seguridad del 50% para aplicaciones de ingeniería por lo que se establezcan la relación normalizada como 0.08.

Referencias

- [1] Blight, G. (2010) "Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities", CRC Press.
- [2] Davies, M.P.; McRoberts, E.C. and Martin, T.E. (2002) "Static Liquefaction of Tailings – Fundamentals and Case Histories". Proceedings of Tailings Dams 2002 – ASDO/USCOLD, Las Vegas.
- [3] Jefferies, M. and Been, K. (2006) "Soil Liquefaction - A Critical State Approach", London.
- [4] Casagrande, A. (1936) "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills", Journal of the Boston Society of Civil Engineers.
- [5] Poulos, S. (1981) "The Steady State of Deformation", Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 107, n° 5, pp. 553-562.
- [6] Castro, G. (1969) "Liquefaction of Sands" Tesis de Doctorado, Harvard University.
- [7] Ishihara, K. (1993) "Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes", Geotechnique, vol. 43, n° 3.
- [8] Kramer, S. (1996) Geotechnical Earthquake Engineering, Washington University - Prentice Hall.
- [9] Olson, S. M. and Stark, T. D. (2003) "Use of Laboratory Data to Confirm Yield and Liquefied Strength Ratio Concepts" Canadian Geotechnical Journal, vol. 40, p. 1164–1184.
- [10] Baziar, M. H. and Dobry, R. (1995) "Residual Strength and Large Deformation Potential of Loose Silty Sands" Journal of Geotechnical Engineering, vol. 121, n° 12, pp. 896-906
- [11] Pillai, V. S. and Salgado, F. M. (1994) "Post-liquefaction Stability and Deformation analysis of Duncan Dam" Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, n° 6, pp. 967-978.
- [12] Castro, G. and Troncoso, J. (1989) "Effects of 1989 Chilean earthquake on three tailings dams" Proceedings of the 5th Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering - Santiago, Chile
- [13] Idriss, I. M. and Boulanger, R. (2008) Soil Liquefaction during Earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, California
- [14] Reid, D. and Fourie, A. (2014) "Estimating Post-liquefaction Strength in the Design Stage - A Review and Update", Proceedings of Paste 2014 Conference, Vancouver
- [15] Roman, B. (2018) "Flow Failure of Saturated Aluminum Ore Under Undrained Monotonic Loading", Tesis de Maestría, The University of Tokyo