# Liquefaction potential study of thickened tailings deposits

Christian Ledezma, Gabriel Ferrer, & Esteban Sáez Department of Structural and Geotechnical Engineering – Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile



## ABSTRACT

Copper production is an essential component of Chilean economy. During the extraction process of copper, large quantities of waste materials (tailings) are produced, which are typically stored in large tailing ponds. Thickened Tailings Disposal (TTD) is an alternative to conventional tailings ponds. In TTD a considerable amount of water is extracted from the tailings before their deposition, increasing the storage capacity of the deposit and its seismic stability. Once a thickened tailings layer is deposited it loses water and it shrinks, forming a relatively regular structure of tailings' blocks with vertical cracks in between, which are filled up with "fresh" tailings. The dynamic response of a representative column of this complex structure made of "solid" blocks with softer material in between was analyzed using a periodic half-space finite element model. The tailings behavior was modeled using an elasto-plastic multi-yielding constitutive model. An important aspect of this study was the liquefaction potential evaluation of TTD.

#### RESUMEN

La producción de cobre es una parte esencial de la economía de Chile. Al extraer el cobre, se producen grandes cantidades de relave, los que son generalmente almacenados en tranques de relave. Los depósitos de relave espesado (TTD, *Thickened Tailings Disposal*) son una alternativa a los depósitos convencionales, en que se extrae gran parte del agua antes de depositarlos, aumentando la capacidad de almacenamiento y la estabilidad sísmica. Una vez que se deposita una capa de relave espesado, ésta pierde agua por desecación, generándose grietas de contracción en la superficie, las que luego se llenan con relave fresco. La respuesta dinámica de una columna representativa de esta estructura compleja formada por bloques "sólidos" con material más blando entremedio fue analizada mediante un modelo unidimensional periódico utilizando elementos finitos, y considerando para el comportamiento del relave un modelo constitutivo elasto-plástico multi-mecanismos. Un aspecto importante de este estudio fue la evaluación del potencial de licuefacción del TTD.

#### 1 INTRODUCCIÓN

En la minería de cobre chilena, aproximadamente el 1% en peso del material que se extrae de las minas corresponde al mineral, mientras que el resto corresponde a residuos mineros o "relave" (Verdugo, 2011). En efecto, cada día se deposita más de un millón de toneladas de relave en nuestro país (Troncoso y Garcés, 2000). Ha habido ocasiones en las que no se han tomado las medidas de seguridad necesarias para almacenar estos residuos, y se han producido catástrofes con derrames de miles de metros cúbicos de relave, causando un serio impacto ambiental y, en algunos casos, incluso pérdidas humanas. Por ejemplo, producto del terremoto que azotó a la zona central de Chile el 28 de marzo de 1965, fallaron 8 presas de relave; dos de éstas arrasaron con el pueblo El Cobre, en donde murieron más de 200 personas (Verdugo, 2009).

Existen diversas formas de almacenar los relaves. Las más usadas son las presas convencionales, cuyo muro de contención puede estar formado por material de empréstito o por las partículas gruesas del relave. Por otra parte, están los depósitos alternativos de relave, entre los que se encuentran los *Thickened Tailings Disposal* o TTD. El relave espesado es un tipo de relave al cual se le extrae gran parte del agua que lleva, logrando una mayor densidad que el relave convencional,

una mavor capacidad de almacenamiento. eventualmente menores riesgos de infiltración y de licuefacción (Robinsky, 1999). Otra ventaja de este sistema es que los muros perimetrales son, en general, bastante más bajos que los de una presa convencional, y el mismo relave espesado conforma una estructura "autosoportante" que puede depositarse en pequeñas pendientes, incluso en una superficie plana y sin el requerimiento de un muro perimetral (Robinsky, 1999). Por otro lado, algunas de las desventajas de la técnica de relaves espesados están ligadas a la incertidumbre en relación a los cambios de las propiedades del relave con el tiempo (e.g., por oxidación), la susceptibilidad a la licuefacción, la dificultad para predecir el ángulo de inclinación del depósito y el eventual drenaje ácido (Bussière, 2007). De acuerdo a Blight (2003), la implementación de cada método de depositación va a depender de cada caso en particular, y pese a las desventajas que presentan los relaves convencionales, éstos pueden prevalecer en algunos aspectos sobre los depósitos de relaves espesados.

Actualmente no hay experiencias de TTD en la gran minería ni tampoco en países con alto riesgo sísmico como Chile, por lo que en rigor se desconoce si este tipo de depósitos presenta una estabilidad satisfactoria frente a sismos severos (Verdugo y Santos, 2009). Hasta el momento, en los análisis numéricos es usual modelar al relave espesado como un material homogéneo con propiedades equivalentes, sin embargo, estos modelos no representan la estructura real de un depósito de relaves espesados. Al perder la humedad, el relave depositado se contrae y se forman bloques poligonales (Figura 1). Al depositar una nueva capa, estas grietas se van llenando de relave fresco, el que no llega al límite de contracción, por lo que se forma una estructura de bloques sólidos separados por paneles verticales más blandos.

El objetivo principal de este estudio es tener una primera aproximación al problema del comportamiento sísmico de los depósitos de relave espesado, añadiendo al modelo numérico el agrietamiento del material debido a su proceso constructivo, y evaluando la susceptibilidad del material a licuar. Para efectos de este estudio la licuefacción se entiende como la pérdida sustancial de resistencia al corte de suelos granulares relativamente sueltos, saturados, en general no cohesivos, y de baja permeabilidad, al ser sometidos a tensiones de corte cíclicas alternadas. El fenómeno se origina debido a la tendencia del material a contraerse, al consecuente aumento de las presiones de poros y, con ello, a la disminución de las tensiones efectivas entre los granos. La ocurrencia de este fenómeno debido a terremotos se ha observado en presas de relaves en varios países. Por ejemplo, en el reciente terremoto M8.8 del Maule, Chile, del 27 de febrero de 2010, cinco depósitos de relave presentaron diversos niveles de daños. El caso más catastrófico fue el colapso de un tranque de relaves abandonado (Las Palmas), en que el material escurrió aproximadamente 1 km, causando la muerte de una familia de cuatro personas (Verdugo, 2011).



Figura 1. Agrietamiento superficial de un depósito de relaves espesados, Kimberley mine, Sudáfrica (Troncoso, 2009)

Para modelar el comportamiento de los relaves espesados ante cargas cíclicas, se construyó un modelo acoplado de elementos finitos utilizando el programa GEFDyn (Aubry et al., 1986; Aubry y Modaressi, 1996). El proceso de calibración de los parámetros del modelo constitutivo utilizado se resume en la siguiente sección.

## 2 CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO CONSTITUTIVO

Para representar el comportamiento monótono y cíclico de los relaves espesados, se utilizó el modelo elastoplástico multi-mecanismos de Hujeux (Aubry et al., 1982: Hujeux, 1985). Este modelo constitutivo está basado en el principio de los esfuerzos efectivos, utiliza un criterio de falla de tipo Mohr-Coulomb, e incorpora los conceptos de Estado Crítico o Steady State. La representación del comportamiento del suelo consiste en el empleo de tres mecanismos de corte en planos ortogonales y de un mecanismo para trayectorias de cargas isótropas. La evolución del estado de material se basa en endurecimiento isótropo que depende de las deformaciones plásticas, y para tomar en cuenta el comportamiento cíclico se utiliza un endurecimiento de cinemático (Lopez-Caballero Modaressitipo y Farahmand-Razavi, 2010).

A la fecha no hay resultados de ensayos que se hayan efectuado sobre muestras inalteradas obtenidas directamente en este tipo de depósitos en Chile. Cifuentes y Verdugo (2009) tomaron muestras del depósito convencional de relaves de Ovejería de la División Andina de Codelco y, utilizando este material, simularon muestras inalteradas (secadas al sol en cajas) y muestras remoldeadas de relave espesado con un 72% de concentración de partículas sólidas. Luego, efectuaron ensayos triaxiales no-drenados a distintas presiones de confinamiento para caracterizar las respuestas monótona cíclica no-drenada de un relave espesado, y encontrándose que el relave espesado podía presentar respuestas contractivas, y por lo tanto, era susceptible a licuar.

Por otra parte, Verdugo y Santos (2009) realizaron ensayos triaxiales no-drenados en un amplio rango de presiones de confinamiento, sobre muestras que pretendían reproducir y comparar la respuesta cíclica y monótona de los dos estados extremos en que se podría encontrar el relave espesado en el depósito: para un índice de vacíos mínimo (muestra seca y re-saturada) y un índice de vacíos máximo (como "pulpa" húmeda). Según Robinsky (1999), el mayor aumento de resistencia de los relaves espesados debería ocurrir por desecación: se producen succiones capilares entre las partículas finas, acercándolas entre sí y expulsando agua hacia la superficie (la que luego es evaporada), provocando un aumento de la densidad, y con ello de resistencia en el material. Sin embargo, las muestras de Verdugo y Santos (2009) presentaron un comportamiento contractivo (potencialmente licuable), y se concluyó que la desecación del relave espesado no provee un aumento significativo de la densidad, siendo más importante la densificación por incremento del confinamiento.

Para calibrar los parámetros de los bloques sólidos del relave espesado, se decidió utilizar las curvas de comportamiento que obtuvieron Cifuentes y Verdugo (2009), principalmente porque presentan más información en cuanto a planos de comportamiento y porque los ensayos efectuados se ajustan de mejor manera a las presiones de confinamiento esperadas para este tipo de depósitos. Además, las probetas ensayadas presentaron respuestas contractivas, y a pesar de que todavía no existe un consenso sobre la tendencia a licuar de los relaves espesados, corresponde a una situación más conservadora respecto al caso dilatante.

Cifuentes y Verdugo (2009) realizaron ensayos triaxiales ICU (*isotropically consolidated undrained*) para las dos tipos de probetas descritas, a presiones de confinamiento isotrópico de 0.5, 1.0, 2.0 y 3.0 kgf/cm<sup>2</sup> (49, 98, 196 y 294 kPa, respectivamente), y se calculó el índice de vacíos final en cada uno de los ensayos. Las probetas ensayadas presentaron respuesta contractiva, no habiendo mayores diferencias entre las respuestas de las probetas de caja y las remoldeadas para confinamientos mayores a 1.0 kgf/cm<sup>2</sup>.

Para comparar el comportamiento monótono de los ensayos con la respuesta del modelo numérico, se utilizaron sólo las curvas para confinamientos de 1.0, 2.0 y 3.0 kgf/cm<sup>2</sup> de las muestras "inalteradas" que presentaron respuestas contractivas. Algunos de los parámetros calibrados del modelo de relave espesado se resumen en la Tabla 1.

	Presión de Confinamiento			
	[kPa]	98	196	294
Elasticidad	K <sub>ref</sub> [MPa]	444	444	444
	G <sub>ref</sub> [MPa]	222	222	222
	n <sub>el</sub>	0.5	0.5	0.5
	p <sub>ref</sub> [MPa]	1	1	1
Estado Crítico				
y Plasticidad	Φ' <sub>pp</sub> [º]	35	35	35
	β	20	20	20
	p' <sub>co</sub> [MPa]	0.06	0.12	0.178
	d	1.7	1.7	1.7
Regla de				
Flujo	Ψ [º]	35	35	35

En la Tabla 1, K<sub>ref</sub> y G<sub>ref</sub> corresponden al módulo de compresión isotrópico y al módulo de corte a la presión de referencia p<sub>ref</sub>, respectivamente; n<sub>el</sub> es el exponente de la ley elástica no-lineal que relaciona estos módulos con el confinamiento. Por otra parte,  $\Phi'_{pp}$  es el ángulo de fricción en plasticidad perfecta,  $\beta$  es la compresibilidad plástica del material, p'<sub>co</sub> es la presión crítica correspondiente al índice de vacíos inicial, d es la distancia de la *Isotropic Consolidation Line* (ICL) a la *Critical State Line* (CSL) y  $\psi$  es el ángulo característico (Luong, 1980).

Por otra parte, en la Figura 2 se comparan las curvas simuladas y las curvas obtenidas mediante los ensayos triaxiales monótonos no-drenados realizados por Cifuentes y Verdugo (2009). Además, se simularon ensayos de corte cíclico drenado y, a partir de estos resultados, se obtuvieron las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento para distintas presiones de confinamiento que se muestran en las Figuras 3 y 4. A modo de referencia, en estas figuras se han incluido las curvas de degradación obtenidas para arenas de relave convencional de Troncoso (1992) y de Rojas-González et al. (1985). Finalmente, se simularon también ensayos triaxiales cíclicos no-drenados para las tres presiones de confinamiento, con el objeto de comparar los resultados con las curvas de resistencia cíclica obtenidas por Cifuentes y Verdugo (2009), para el criterio de licuefacción al alcanzar una doble amplitud (D.A.) de deformación de 5%. En este caso se obtuvieron resistencias a la licuefacción menores a las de los ensayos realizados (Figura 5).





Figura 2. Comparación de resultados de ensayos triaxiales monótonos CIU en muestras inalteradas (Cifuentes y Verdugo, 2009), con las curvas del modelo constitutivo



Figura 3. Curva de degradación normalizada del módulo de corte con la deformación angular, para las distintas presiones de confinamiento



ura 4. Variación del amortiguamiento con la deformación angular, para las distintas presiones de confinamiento



Number of cycles to liquefaction [-] (Double Amplitud 5%)

## 3 RESPUESTA DINÁMICA DE UNA COLUMNA DE SUELO REPRESENTATIVA DEL TTD

Se construyó un modelo numérico unidimensional en deformaciones planas de una columna de relave espesado de 30 m de profundidad apoyada sobre una roca basal de 5 m de profundidad. La altura de la columna se eligió de tal forma de no exceder los niveles de presiones de confinamiento para las cuales se calibraron los parámetros. El ancho de la columna es de 1.05 m para compatibilizar el ancho de grieta típico (5 cm) con la periodicidad implícita del modelo.

Barbour et al. (1993) estudiaron las condiciones de saturación del relave espesado de la mina Kidd Creek de cobre y zinc en Ontario (Canadá), y obtuvieron como permeabilidad promedio un valor de aproximadamente  $1.3 \times 10^{-7}$  m/s. En su estudio concluyeron que, incluso para la máxima razón potencial de evaporación, los relaves espesados tienden a estar en una condición completamente saturada. Dadas las propiedades del relave espesado de Cifuentes y Verdugo (2009), se decidió adoptar una permeabilidad vertical de  $10^{-7}$  m/s, que coincide con el orden de magnitud de las permeabilidades de relaves espesados de características semejantes. La napa freática se ubicó a nivel de la superficie.

Para evaluar el valor del coeficiente de empuje en reposo del depósito, se simuló en forma numérica la construcción por capas, obteniéndose una valor promedio en profundidad muy similar al calculado con la fórmula de Jaky (1944):  $K_0 = 1 - \sin(\Phi'_{pp}) = 0.43$ .

La excitación sísmica fue introducida en el modelo numérico como un esfuerzo de corte impuesto bajo la roca elástica. Para garantizar la naturaleza unidimensional del modelo, se impuso a la columna una cinemática de viga de corte, en que los esfuerzos normales y los desplazamientos de los nodos que se encuentran a una misma profundidad en dos bordes laterales opuestos son los mismos en todas las direcciones. Además, se añadieron elementos de tipo paraxiales bajo la roca basal para simular una base elástica infinita, lo que permite introducir las ondas incidentes y simular la propagación hacia el infinito de las ondas reflejadas y refractadas (Modaressi y Benzenati, 1994; Aubry y Modaressi, 1992; Modaressi, 1987).

Para el análisis dinámico, se utilizaron registros corregidos del terremoto del 3 de marzo de 1985 en la zona central de Chile, todos registrados en roca (Riddell, 1995). En este artículo sólo se presentarán los resultados para el registro de la estación Universidad Federico Santa María Dirección Norte 70º Este (USMN70E).

#### 3.1 Respuesta de una Columna Homogénea

Con el objetivo de cuantificar los efectos de la fisuración del relave sobre el potencial de licuación, se procedió en primer lugar a generar un modelo perfectamente homogéneo, i.e. sin grietas. Para los 10 m más superficiales del modelo se utilizaron los parámetros calibrados para una presión de confinamiento de 98 kPa, en los siguientes 10 m se utilizaron los parámetros para 196 kPa, y en los últimos 10 m los parámetros calibrados para 294 kPa.

Para la inicialización estática de las condiciones del suelo saturado, se simuló un tiempo lo suficientemente largo como para conseguir la consolidación, es decir, para que se disiparan los excesos de presiones de poros y se alcanzara una distribución hidrostática de presiones de poros.

A partir de dicho estado inicial, se realizó un cálculo dinámico elástico, para calcular el período propio y el perfil de velocidades de ondas de corte de la columna a pequeña deformación (pequeña amplitud sísmica). Se determinó que el modo fundamental corresponde a una frecuencia de 1.56 Hz. Suponiendo un perfil homogéneo, es posible calcular la velocidad de corte promedio como  $4 \cdot \text{H} \cdot \text{f} = 187.2 \text{ m/s}.$ 

Figura 5. Comparación de las curvas de resistencia cíclica para las distintas presiones de confinamiento

Para el análisis dinámico inelástico, el modelo fue corrido utilizando los registros sin modificar su amplitud.



Figura 6. Asentamiento y aceleraciones del extremo superior de la columna versus tiempo, para el registro USMN70E

En la Figura 6 se muestra la respuesta en la superficie de la columna, calculada en el nodo central superior de la columna. Se obtuvo un PGA aproximado de 4 g, lo que constituye una gran amplificación del movimiento en relación a la aceleración máxima en el afloramiento rocoso (0.18 g). Se observa, además, un brusco asentamiento en los primeros segundos del registro, que coincide con instantes de grandes aceleraciones. A los 10 segundos aproximadamente, se produce licuefacción en los metros superiores de la columna, por lo que disminuyen considerablemente las aceleraciones en la superficie y el asentamiento tiende a estabilizarse. En la medida que se disipan levemente las presiones de poros, se vuelven a producir grandes aceleraciones en la superficie, aumentan las zonas licuadas en la columna y con esto el asentamiento. El valor del asentamiento final, pese a ser pequeño, constituye una buena medida de la licuefacción observada en la columna, ya que de acuerdo a una serie de modelos analizados, mientras más zonas potencialmente licuables se generan en la columna, mayor es el asentamiento obtenido.

Por otro lado, se calcularon además perfiles de aceleración (Figura 7) y el promedio de la aceleración en profundidad para cada instante de tiempo (Figura 8). En esta última Figura se observa un crecimiento considerable de los valores de aceleración entre los 25 y 30 segundos de excitación, lo que coincide con un brusco asentamiento (Figura 6). Por otra parte, las disminuciones bruscas se deben a que en esos instantes hay muchas zonas que licúan en la columna, que funcionan como filtros ya que no son capaces de transferir el esfuerzo de corte. Una vez que se disipan los excesos de presiones de poros en algunos elementos del modelo, las aceleraciones vuelven a incrementarse. En la Figura 8 se muestra, además, el valor promedio de la aceleración entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% de la Intensidad de Arias (Arias, 1970), y el valor promedio más una desviación estándar.



Figura 7. Perfil de aceleraciones en la profundidad para el caso del modelo homogéneo



Figura 8. Evolución de la aceleración promedio en profundidad con el tiempo, para el caso del modelo homogéneo

En la Figura 9 se muestra la envolvente de incrementos de presiones de poros en la profundidad, para distintos instantes de este registro. Las líneas finas indican los perfiles instantáneos de incrementos de presiones de poros para una serie de tiempos de observación. En aquellas zonas en que la presión de poros alcanza consistentemente un valor semejante al de la tensión vertical inicial se puede anticipar la ocurrencia de licuefacción. De acuerdo a este análisis, se observa la ocurrencia de licuefacción hasta los 11 m de profundidad, aproximadamente.

Los "peaks" de zonas licuable que se observan a distintas profundidades (Figura 9), ocurren posiblemente porque el contenido de frecuencias del sismo activa modos de vibrar que conducen a distintos niveles de esfuerzos de corte solicitante en la columna a dicha profundidad. En un modelo inelástico como el empleado, los modos de vibrar de la columna varían durante la carga, ya que las propiedades del material evolucionan, lo que podría inducir distinta sensibilidad de la columna de relave ante las solicitaciones de acuerdo a las frecuencias de excitación del sismo impuesto.



Figura 9. Perfil de variaciones de presiones de poros con la profundidad para el caso del modelo homogéneo

### 3.2 Respuesta del Modelo Incorporando el Agrietamiento

Para incorporar el efecto de las grietas, se implementó un algoritmo de generación aleatoria de grietas, respetando las restricciones geométricas características de este tipo de depósitos. Se asumió que la distribución de las grietas no tenía correlación de una capa a otra. Para los análisis se utilizó un ancho de grieta de 5 cm, que coincide con el ancho del elemento finito, capas de 20 cm de altura, y bloques sólidos de entre 30 y 45 cm de ancho (distribución uniforme). Una realización de los modelos generados se muestra en la Figura 10, donde además se puede apreciar que en los bordes de algunas capas aparecen bloques sólidos de 1 elemento, los que físicamente corresponden a continuaciones de bloques adyacentes e ilustran la periodicidad del modelo.

Dado que para cada una de las realizaciones de distribución de grietas interesaba principalmente evaluar el asentamiento final de la columna y el potencial de licuefacción, los registros se corrieron hasta el tiempo correspondiente a un 95% de la Intensidad de Arias, con el objetivo de reducir el tiempo de ejecución. Dado que no se disponía de información sobre el comportamiento del material almacenado en las grietas, se supuso que al estar en un estado con mayor contenido de humedad se encontraba con una menor densidad y, por tanto, con un índice de vacíos más alto. De esta forma, basándose en una correlación obtenida por Barbour et al. (1993) entre el índice de vacíos y valores de permeabilidad obtenidos en ensayos de relaves espesados, se optó por mantener las mismas propiedades de los bloques sólidos, pero aumentando el valor de la permeabilidad en un orden de magnitud para el material depositado en las grietas.



Figura 10. Esquema de modelo incorporando el agrietamiento

La Figura 11 muestra que para ciertas realizaciones se obtienen asentamientos finales mayores a los del caso homogéneo, y en otras se obtienen valores menores.

Para evaluar la consistencia estadística de los datos, se calculó también el valor del coeficiente de variación C.V. (cuociente entre la desviación estándar y la media) para los asentamientos finales obtenidos. Se observa que luego de algunas realizaciones, el C.V. se estabiliza bajo el 10%, lo que se considera como estadísticamente aceptable (Figura 12).



DATA (49 realizations) Mean Mean  $\pm 0.5\sigma$ Homogeneous USMN70E -10 Depth [m] -15 -20 -25 -30 50 100 150 200 250 300 350 0 ∆ u<sub>...</sub> [kPa]

Figura 11. Comparación de la evolución del asentamiento dinámico de la columna entre el modelo homogéneo y los modelos con distintas distribuciones de grietas



Figura 12. Coeficiente de variación del valor del asentamiento final con respecto al número de realizaciones

La Figura 13 presenta la envolvente de variaciones de presiones de poros para las 49 realizaciones en comparación con el caso homogéneo. En dicha figura se puede apreciar que el efecto de las grietas provoca en algunos casos licuefacción incluso hasta los 25 m de profundidad. Se puede apreciar, además, que la envolvente del caso homogéneo se ajusta bien al promedio de las envolventes de las realizaciones, lo que es consistente con los resultados obtenidos con los asentamientos.

Figura 13. Comparación del perfil de variaciones de presiones de poros con la profundidad entre el caso del modelo homogéneo y los modelos con agrietamiento

## 4 CONCLUSIONES

Se logró calibrar los parámetros de un modelo elastoplástico para representar el comportamiento monótono y cíclico de relaves espesados, a partir de resultados de ensayos triaxiales en muestras inalteradas que simulan el proceso constructivo real. A partir de este resultado, se confeccionaron modelos de una columna representativa de relave espesado, en primer lugar sin considerar el efecto de las grietas de contracción, y luego incluyéndolas en el modelo como una variación de la permeabilidad, comparando la respuesta dinámica de la columna en términos de asentamientos co-sísmicos, generación de presiones de poros y perfiles de aceleración.

Si bien los valores de los asentamientos dinámicos son bajos, el efecto de incorporar el material almacenado en las grietas de contracción hace variar la cantidad de zonas potencialmente licuables en la profundidad. Esta variabilidad de los resultados depende en mayor medida de la magnitud del sismo, más que de la distribución espacial de las grietas. Para el sismo analizado y el tamaño de grietas considerado en este articulo, el valor del asentamiento del modelo homogéneo coincidió con el valor del asentamiento promedio de las realizaciones, por lo que el efecto de agregar las grietas a este modelo no tendría una mayor influencia en términos promedios para el sismo considerado. Además, se obtuvo un buen ajuste de la envolvente de las variaciones de presiones de poros del caso homogéneo con respecto al promedio de las envolventes de las realizaciones.

Los resultados presentados en este artículo muestran un efecto poco relevante de las grietas sobre el potencial de licuefacción y asentamientos co-sísmicos para el registro considerando. Sin embargo, estudios preliminares actualmente en curso han mostrado que los efectos de las grietas son variables dependiendo del movimiento considerado, pudiendo incrementar los asentamientos y el potencial de licuefacción. Por lo tanto, un estudio más exhaustivo actualmente en curso permitirá obtener conclusiones más generales y establecer recomendaciones de diseño.

# AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen profundamente el apoyo de MWH Global a través de su beca para estudiantes de Magíster, y especialmente al Prof. Jorge Troncoso por su constante apoyo y consejo a lo largo de esta investigación.

Se agradece además a MSc Loreto Cifuentes por haber facilitado los resultados experimentales que se emplearon para la calibración del modelo constitutivo.

## REFERENCIAS

- Arias, A. 1970. A Measure of Earthquake Intensity, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, R.J. Hansen. MIT Press, Cambridge, Mass.: 438-483.
- Aubry, D., Chouvet, D., Modaressi, A., and Modaressi, H. 1986. GEFDYN: Logiciel d'Analyse de Comportement Mécanique des Sols par Eléments Finis avec Prise en Compte du Couplage Sol-Eau-Air, Manuel Scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSSMat, 1st ed., Paris, France.
- Aubry, D., Hujeux, J.-C., Lassoudière, F., and Meimon, Y. 1982. A Double Memory Model with Multiple Mechanisms for Cyclic Soil Behaviour, *International symposium on numerical models in geomechanics*, Zürich, Switzerland: 3-13.
- Aubry, D., and Modaressi, A. 1996. *GEFDYN, Manuel Scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat*, 1st ed., Paris, France.
- Aubry, D., and Modaressi, H. 1992. Seismic Wave Propagation in Soils including Non-Linear and Pore Pressure Effects, *Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, France: 209-224.
- Barbour, S.L., Wilson, G.W. and St-Arnaud, L.C. 1993. Evaluation of the saturated-unsaturated groundwater conditions of a thickened tailings deposit, *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6): 935-946.
- Blight, G. 2003. Quantified comparison of disposal of thickened and unthickened tailings, *Tailings and Mine Waste 2003*: 63-71.
- Bussière, B. 2007. Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches, *Canadian Geotechnical Journal*, 44: 1019-1052.
- Cifuentes, L. and Verdugo, R. 2009. Undrained Monotonic and Cyclic Response in Thickened Tailings, *Paste* 2009, Viña del Mar, Chile: 313-322.
- Hujeux, J. 1985. Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols, *Génie parasismique*, France: 278-302.

- Jaky, J. 1944. The Coefficient of Earth Pressure at Rest, Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7: 355-358.
- Lopez-Caballero, F., and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. 2010. Assessment of variability and uncertainties effects on the seismic response of a liquefiable soil profile, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30: 600-613.
- Luong, M. 1980. Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents, *Revue Française de Géotechnique*, 10(1): 39-53.
- Modaressi, H. 1987. Modélisation numérique de la propagation des ondes dans les milieux poreux anélastiques, *Thése de doctorat*, Ecole Centrale Paris, France.
- Modaressi, H., and Benzenati, I. 1994. Paraxial approximation for poroelastic media, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(2): 117-129.
- Riddell, R. 1995. Inelastic design spectra accounting for soil conditions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 24(11): 1491-1510.
- Robinsky, E. 1999. *Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry*, 1st ed., Toronto, Canada.
- Rojas-González, L., Ben-Khalal, H. and Lewis, K. 1985. Dynamic Properties and Behavior of Copper Tailings, *XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, USA, 3: 1289-1292.
- Troncoso, J.H. 1992. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica*, 2nd ed., Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Troncoso, J.H. 2009. Comunicación personal.
- Troncoso, J.H. and Garcés, E. 2000. Ageing effects in the shear modulus of soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19: 595-601.
- Verdugo, R. 2009. Seismic performance based-design of large earth and tailing dams, *Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, ICPBD Conference, Tsukuba, Japan: 41-60.
- Verdugo, R. 2011. Seismic Stability Analysis of Large Tailings Dams, 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- Verdugo, R. and Santos, E. 2009. Liquefaction Resistance of Thickened Tailings of Copper Mines, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.