

# SIMULACIÓN DE LA FALLA POR LICUACIÓN EN PRESAS DE JALES

MIGUEL A. MÁNICA,  
MARCOS ARROYO, ANTONIO GENS,  
EFRAÍN OVANDO-SHELLEY, EDUARDO BOTERO  
Y OSVALDO FLORES-CASTRELLÓN

En este trabajo se explora el uso de un modelo constitutivo basado en la teoría de estado crítico para la simulación numérica de la falla en presas de jales\* que involucren licuación de flujo. Se mencionan brevemente las características principales de la formulación, así como un procedimiento para facilitar la selección de los parámetros. La metodología propuesta se aplica a la simulación numérica de la falla de Merriespruit, una presa de jales de oro en Sudáfrica que colapsó en la década de los noventa.

## Falla de la presa Merriespruit y el fenómeno de licuación de flujo

El 22 de febrero de 1994, unas cuantas horas después de una lluvia muy intensa, una porción de la pared norte del compartimento 4A de la presa de jales de oro en Merriespruit, Sudáfrica, falló resultando en la movilización, alrededor de 600,000 m<sup>3</sup> de material que fluyeron en dirección del poblado causando la muerte de 17 personas y un desastre medioambiental. Una descripción detallada de la construcción de la presa, su operación y la falla, puede consultarse en Wagener (1997). Investigaciones posteriores al colapso determinaron que la falla se debió al desbordamiento del agua libre sobre los jales, debido a la lluvia, que causó la erosión de los taludes y desencadenó la falla generalizada de una porción de la presa. Particularmente, Fourie *et al.* (2002) propusieron que la erosión de los taludes fue el detonante para la ocurrencia del fenómeno de licuación de flujo.

El fenómeno de licuación de flujo es particularmente relevante en el problema de la estabilidad de presas de jales. La licuación de flujo, también conocida como licuación estática, es un fenómeno que exhiben algunos materiales contractivos

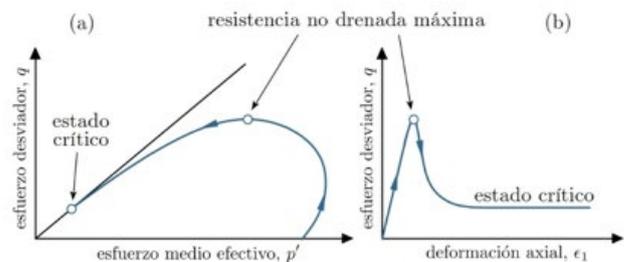


Figura 1. Reblandecimiento no drenado:  
a) trayectoria de esfuerzos y b) curva esfuerzo-deformación

cuando se someten a carga en condiciones no drenadas (o de drenaje parcial), donde la resistencia adquiere un valor máximo para después disminuir rápidamente hasta alcanzar la condición de estado crítico (Figura 1). Esta última está caracterizada por la distorsión del material sin cambio de volumen y sin cambio en los esfuerzos efectivos. La licuación de flujo conduce a estructuras geotécnicas frágiles, donde la falla puede propagarse a gran velocidad.

Este fenómeno se puede presentar cuando los jales se depositan en estado suelto y permanecen saturados. Numerosas fallas alrededor del mundo tienen su origen en la licuación de flujo y han sido la causa de la pérdida de numerosas vidas y desastres medioambientales.

Los análisis de estabilidad convencionales, basados en métodos de equilibrio límite, no están bien adaptados para incorporar un comportamiento frágil con reblandecimiento. Esto ha contribuido a que la frecuencia de ocurrencia de fallas en presas de jales sea significativamente mayor en comparación a otras estructuras geotécnicas similares, como las presas de almacenamiento de agua (Davies *et al.*, 2001). Otras alternativas para evaluar la estabilidad de estas estructuras, que comienzan a ganar mayor aceptación, son los análisis tenso-deformacionales a partir de métodos numéricos por ejemplo el método de elemento finito. En este tipo de análisis, la selección del modelo constitutivo para caracterizar el comportamiento de los jales es un aspecto fundamental.

\* Jales: residuos mineros producto de la trituración y molienda del mineral extraído después de recuperar los metales comerciales utilizando procesos físicos y químicos.

## Modelo constitutivo

Se utiliza una versión ligeramente modificada del modelo constitutivo Clay And Sand Model (CASM) (Yu 1998). CASM se desarrolló originalmente como una extensión de los modelos de estado crítico clásicos, por ejemplo, el Cam Clay modificado, incorporando explícitamente el concepto del parámetro de estado  $\psi$  (Been y Jefferies, 1985). Este último se define como la diferencia entre el volumen específico  $v$  y el volumen específico sobre la línea de estado crítico (CSL) para el mismo valor del esfuerzo medio efectivo  $p'$  (ver Figura 2).

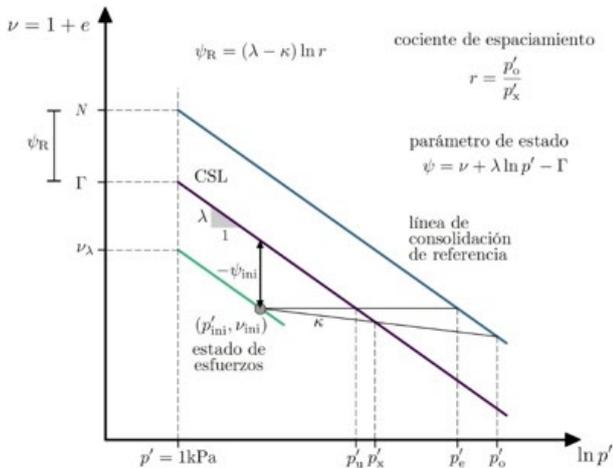


Figura 2. Definiciones en el modelo CASM (modificado de Yu, 1998)

El parámetro de estado proporciona información respecto al comportamiento esperado del material bajo esfuerzos desviadores. Si el parámetro de estado es negativo, el material exhibirá un comportamiento dilatante; si es positivo, exhibirá un comportamiento contractivo.

La función de fluencia del CASM se puede expresar como:

$$f = \left( \frac{q}{p' M_\theta} \right)^n + \frac{1}{\ln r} \ln \frac{p'}{p'_o} \quad (1)$$

donde  $q$  es un invariante del tensor de esfuerzo desviador,  $M_\theta$  es la pendiente de la CSL en el plano  $q-p'$  (que depende del ángulo de Lode  $\theta$ ),  $p'_o$  es el esfuerzo de fluencia isotrópico,  $n$  es un parámetro que controla la forma de la función de fluencia y  $r$  define la distancia entre la CSL y la línea de consolidación de referencia (ver Figura 2). La Figura 3 muestra la forma de la función de fluencia para diferentes valores de  $n$ . A diferencia del Cam Clay modificado, el estado crítico no necesariamente se alcanza en el punto más alto de la función. Esta característica es, precisamente, lo que permite el comportamiento de reblandecimiento no drenado que caracteriza el fenómeno de licuación de flujo. Más detalles de la formulación pueden consultarse en Yu (1998).

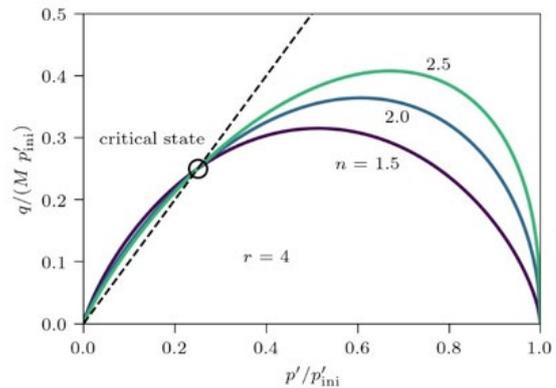


Figura 3. Superficie de fluencia normalizada del CASM para diferentes valores de  $n$  (modificado de Yu, 1998)

## Determinación de parámetros y aplicación a la falla de Merriespruit

Aunque gran parte de los parámetros necesarios del CASM pueden determinarse a partir de procedimientos de laboratorio bien establecidos; otros parámetros, como por ejemplo  $n$  y  $r$ , no tienen *a priori* un significado físico claro. En este trabajo se propone un procedimiento iterativo para su determinación en función de parámetros convencionales, de gran aceptación en la ingeniería geotécnica práctica. Los detalles de dicho procedimiento pueden consultarse en Mánica *et al.* (2021).

La hipótesis principal es que la resistencia no drenada pico  $s_{u,pk}$  se puede caracterizar a partir del siguiente cociente, que es una constante para un suelo con cierto grado de preconsolidación:

$$Sp = \frac{s_{u,pk}}{p'_{ini}} \quad (2)$$

donde  $p'_{ini}$  es el esfuerzo medio efectivo de consolidación *in situ*. Este enfoque, que hemos utilizado desde hace bastante tiempo para caracterizar la resistencia al corte no drenada en materiales arcillosos (normalmente se usa el esfuerzo vertical efectivo para la normalización), parece funcionar razonablemente para caracterizar la resistencia no drenada pico en materiales que exhiben el fenómeno de licuación de flujo (Mánica *et al.*, 2021), incluyendo los residuos mineros.

Con el uso de la metodología propuesta, los parámetros necesarios para caracterizar el CASM son los mostrados en la Tabla 1. El atractivo desde un punto de vista práctico es que todos los parámetros tienen un sentido físico claro, se pueden determinar con procedimientos de laboratorio y/o campo bien establecidos (Jefferies y Been 2016) sin la necesidad de ningún parámetro de ajuste en la ley constitutiva.

La metodología propuesta se aplicó a la simulación de la presa de jales de Merriespruit en Sudáfrica a través de un análisis bidimensional (deformación plana) de elemento finito.

Los detalles de la simulación pueden consultarse en Mánica *et al.* (2021). La erosión, causada por el desbordamiento del agua libre, se simuló retirando una pequeña porción del talud inferior, asumiendo condiciones no drenadas. Esto resultó en el desencadenamiento de la licuación, que se propagó rápidamente hasta formar una superficie de falla cinemáticamente admisible que permitió la movilización de una gran cantidad de material (Figura 4).

**Tabla 1. Parámetros necesarios para caracterizar al CASM**

$\Gamma$	Valor de $v$ sobre la CSL para $p'=1$ kPa en un gráfico $v-\ln p'$
$\lambda$	Pendiente de la CSL en un gráfico $v-\ln p'$
$M$	Pendiente de la CSL en un gráfico $q-p$
$\psi_{ini}$	Parámetro de estado inicial
$S_p$	Cociente de resistencia no drenada pico
$K_o$	Coefficiente de empuje de tierras en reposo
$\kappa$	Pendiente de descarga-recarga en un gráfico $v-\ln p'$
$\mu$	Relación de Poisson

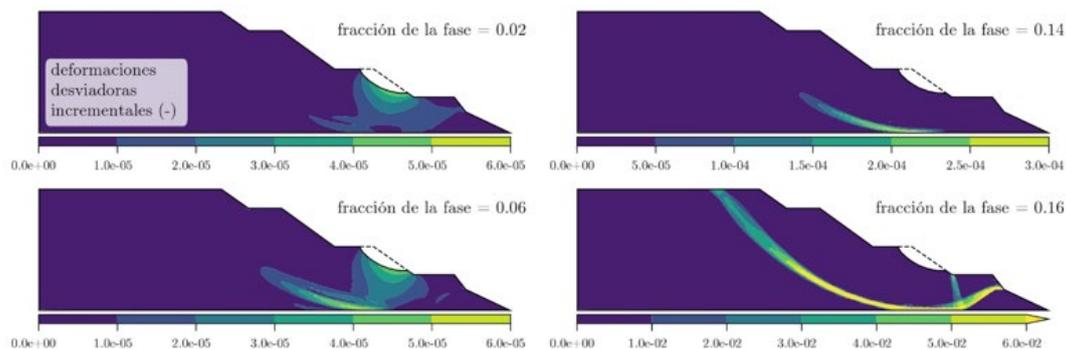


Figura 4. Contornos de deformaciones desviadoras incrementales después de la remoción del material erosionado

## Conclusiones

Este trabajo presenta la aplicación de un modelo constitutivo, basado en la teoría del estado crítico, en la simulación de la falla de la presa de jales mineros de Merriespruit. El modelo incorpora, de forma natural, el reblandecimiento bajo carga no drenada que caracteriza el fenómeno de licuación de flujo. Se propone también, una metodología para la determinación de los parámetros del modelo a partir de procedimientos de laboratorio y/o campos convencionales. Los resultados de la simulación confirman la hipótesis de Fourie *et al.* (2002), respecto a que la erosión de una porción relativamente pequeña del talud fue suficiente para desencadenar la licuación de flujo, la cual, se propagó hasta causar el colapso de una porción de la presa.

Es importante mencionar que el fenómeno de licuación de flujo sólo puede ocurrir en condiciones no drenadas o de drenaje parcial (tanto en el CASM como en la realidad). Aunque la simulación presentada asume una condición no drenada perfecta, el CASM es un modelo formulado en términos de esfuerzos efectivos que puede utilizarse, también, en simulaciones hidromecánicas acopladas. Esto permite su aplicación, por ejemplo, para explorar si la licuación de flujo puede ocurrir tomando en cuenta factores como tiempo de construcción, condiciones hidráulicas transitorias o interacciones atmosféricas, entre otros. Se espera que la generalización de este tipo de análisis contribuya a disminuir la frecuencia de ocurrencia de fallas en este tipo de estructuras. |

## Referencias

- Been, K. y Jefferies, M. G. (1985). "A state parameter for sands." *Géotechnique*, 35(2), 99–112.
- Davies, M.; Martin, D. y P. L. (2001). "Tailings dam stability-essential ingredients for success." *Slope stability in surface mining*. W. A. Hustrulid, M. K. McCarter y D. J. A. Van Zyl, eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 365–378.
- Fourie, A. B.; Blight, G. E. y Papageorgiou, G. (2002). "Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure: Reply." *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), 1441–1442.
- Jefferies, M. y Been, K. (2016). *Soil liquefaction: A critical state approach*. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- Mánica, M.; Arroyo, M. y Gens, A. (2021). "Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, (under review).
- Robertson, P.; de Melo, L.; Williams, D. J. y Wilson, G. W. (2019). "Report of the expert panel on the technical causes for the failure of Feijão Dam. Published online at <http://www.b1technicalinvestigation.com/>."
- Wagner, F. (1997). "The Merriespruit slimes dam failure: overview and lessons learned." *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 39(3), 11–15.
- Yu, H. S. (1998). "CASM: a unified state parameter model for clay and sand." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(8), 621–653.



Figura 5. Toma aérea falla de Merriespruit