

Calibración y aplicación de los modelos constitutivos CASM y NorSand para relaves de hierro

Calibration and application of CASM and NorSand constitutive models for iron ore tailings

Martín Castillo

Klohn Crippen Berger S. A., Perú, mcastillo@klohn.com

Jackeline Huertas & Hugo Ninanya

Klohn Crippen Berger S. A., Brasil

ABSTRACT: In the last century, several collapses of tailings dams have demonstrated the high vulnerability of these structures to static liquefaction phenomena, particularly in those constructed using the upstream method. Constitutive models founded on the critical state theory offer an appealing approach for calibrating behaviors that exhibit strain softening. This study compares the NorSand and CASM models applied to iron ore tailings, which would be subject to the static liquefaction condition. The calibrations were performed using the finite element software PLAXIS FE, based on geotechnical investigations involving laboratory tests (CID and CIU triaxial tests) and field tests (sCPTu) on the tailings. The calibration results are presented in terms of shear and axial strains, as well as the development of excess pore pressures relative to deviatoric stress and mean pressures for both constitutive models, highlighting the difference and advantage of the models for an adequate representation of the material behavior. Finally, the computational and numerical advantages and limitations of calibrating the analyzed constitutive models in boundary problem are discussed.

KEYWORDS: NorSand, CASM, numerical calibrations, iron ore tailings, constitutive models, static liquefaction.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de análisis de deformación no lineal para evaluar el potencial de licuación de materiales y sus posibles efectos se ha convertido en una práctica estándar en los proyectos de presas de relaves, especialmente aquellas que están expuestas a dicho riesgo.

Casos históricos de rupturas de presas como Merriespruit (1994), Mount Polley (2014), Fundão (2015), Cadia (2018) y Brumadinho (2019) han sido evaluados utilizando los modelos constitutivos mencionados a fin de simular el comportamiento del material hasta alcanzar el estado crítico. Es así que la selección de parámetros de entrada para la aplicación de predicciones numéricas es de suma importancia para los análisis de esfuerzo-deformación, ya que requieren procedimientos de calibración basados en ensayos de campo y laboratorio principalmente. Los modelos CASM (Yu 1998) y NorSand (Jefferies 1993), han demostrado capturar una representación adecuada de las condiciones de campo para materiales que exhiben reblandecimiento, convirtiéndose en alternativas atractivas para la evaluación de la estabilidad física de estructuras mineras, y así, poder mitigar los riesgos asociados con posibles colapsos futuros.

Este trabajo presenta los procedimientos utilizados para calibrar los parámetros de entrada de los modelos constitutivos, así como los resultados obtenidos para los distintos escenarios evaluados. Ambos modelos constitutivos fueron calibrados con la herramienta SoilTest de PLAXIS FE como *User-Defined Soil Model* (USDM), basados en el método de elementos finitos, como una *Dynamic Link Library* (DLL).

2 MODELOS CONSTITUTIVOS

Los modelos constitutivos de *Clay and Sand Model* (CASM) y NorSand son basados en la teoría del estado crítico (Roscoe et al. 1958), la cual conjuga la teoría de la elastoplasticidad con endurecimiento, considerando el concepto de variable de estado del material por medio de la variación de la resistencia asociada al cambio de volumen específico, aplicado a materiales granulares con comportamiento contráctil.

2.1 NorSand

El modelo constitutivo NorSand (NS), es capaz de representar el comportamiento contráctil y dilatante, bajo condiciones drenadas y no drenadas, del material considerando tres componentes: Elasticidad, Plasticidad y la Línea de Estado Crítico (LEC). Los parámetros elásticos fueron basados en ensayos que consiguen medir velocidades de ondas de corte (v_s) y consecuentemente el módulo de corte para bajo nivel de deformaciones (G_0), de esa forma se pudo definir la rigidez en función del nivel de confinamiento efectivo (p') del material. Los parámetros plásticos que son definidos a través de las interpretaciones de los ensayos triaxiales son: la razón de fricción crítica M_{ic} , coeficiente de acoplamiento volumétrico N_{ic} y la constante de dilatancia χ_{ic} . Por otro lado, los parámetros de endurecimiento H_0 e H_ψ son calibrados numéricamente simulando el ensayo triaxial en el programa computacional a ser utilizado para el modelamiento. Por último, la LEC puede ser definida siguiendo un ajuste exponencial o logarítmico, tal como se documenta en Jefferies *et al.* (2016) e implementa en PLAXIS FE (Bentley 2022).

La selección del ajuste de la LEC que será utilizado en el modelo numérico dependerá básicamente de cuál de ellas consiga representar de una mejor forma los ensayos triaxiales simulados y de los objetivos del modelamiento numérico. Cabe resaltar que el ajuste exponencial consigue sectorizar con mejor precisión la región contráctil y dilatante del material para bajos niveles de esfuerzos, en cuanto el ajuste logarítmico tiende a sobre estimar la región que define le comportamiento dilatante del material.

2.2 CASM

El CASM (Yu 1998) es un modelo constitutivo capaz de representar el comportamiento por reblandecimiento no drenado dentro de un amplio espectro de materiales, desde arcillas a arenas, normalmente consolidadas a sobreconsolidadas (Gens 2019), incluyendo materiales intermedios, como limos o limos arenosos, los cuales corresponden a la mayoría de los relaves, bajo condiciones drenadas y no drenadas. Su ley de flujo no asociada permite que la línea del estado crítico no coincida necesariamente con el ápice de la superficie de fluencia, siendo esta particularidad la que permite representar el fenómeno de licuación de flujo. Algunas modificaciones fueron realizadas por Mánica *et al.* (2022) a la versión original de Yu (1998), particularmente, para la función del potencial plástico, por medio del parámetro m , la pendiente del estado crítico y la línea de consolidación de referencia en el plano $\ln p' - v$, para la cuantificación de las deformaciones plásticas volumétricas.

El CASM requiere de ocho parámetros de entrada, que pueden ser estimados a partir de pruebas de campo o ensayos de laboratorio convencionales, los cuales pueden ser calibrados de forma simple para la obtención de sus parámetros. En Mánica *et al.* (2022), se detalla un procedimiento para la calibración de los parámetros de entrada del CASM para muestras normalmente consolidadas, la cual suele ser una condición encontrada en residuos mineros. En primer lugar, se determina los parámetros relacionados a la elasticidad (κ y v) y LEC (M_{lc} , Γ y λ) a partir de ensayos de laboratorio de consolidación unidimensional y compresión triaxial. Posteriormente, se calcula el parámetro m , el cual define la forma de la función de potencial plástico y, por lo tanto, define la dirección del flujo plástico, el cual puede relacionarse con el coeficiente de tierras en reposo K_0 mediante la ecuación 1, 2 y 3, en donde η_{K_0} es la relación de oblicuidad en consolidación unidimensional:

$$\frac{9(\lambda-\kappa)(2\mu-1)}{2\kappa\eta_{K_0}(\mu+1)+6\lambda(2\mu-1)} = A + B \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{M}{m} - M\right) \frac{\eta_{K_0}}{M} \quad (2)$$

$$C = \left(\frac{M}{m} - M\right) \left(\frac{\eta_{K_0}}{M}\right)^{1-m} \quad (3)$$

Para el caso de materiales normalmente consolidados, el estado actual de esfuerzos se localiza sobre la superficie de fluencia y el valor de p'_0 se determina a partir de la Ecuación 4; además, la formulación del CASM impone que todas las trayectorias con relación de esfuerzo, η , constantes correspondan a un único valor de parámetro de estado (Ecuación 5):

$$f = \left(\frac{q}{p'_M \theta}\right)^n + \frac{1}{\ln r} \ln \frac{p'}{p'_0} \quad (4)$$

$$\psi = (\lambda - \kappa) \ln r \left[1 - \left(\frac{\eta}{M}\right)^n\right] \quad (5)$$

La resistencia no drenada pico en términos de S_p puede relacionarse directamente con los parámetros del CASM. Para ello, se asume que la resistencia no drenada pico es alcanzada cuando el estado de esfuerzos llega al ápice de la superficie de fluencia, siendo el estado de esfuerzos en ese punto:

$$S_p = \frac{S_{upk}}{p_{ini}} = \frac{q_{pk}}{2p'_{ini}} \quad (6)$$

Finalmente, la estimación de los parámetros r y n puede realizar a través de un proceso iterativo. Una primera aproximación del valor de r puede obtenerse despreciando los términos en corchete de la Ecuación 5, seguido del reemplazo de r en las ecuaciones 7, 8 y 9, y así sucesivamente iterando hasta la convergencia.

$$\exp \left[\left(\frac{1}{\sqrt[n]{n \ln r}} \right)^n \ln r \right] = C \times D \quad (7)$$

$$C = \frac{M}{2S_p \sqrt[n]{n \ln r}} \exp \left[\left(\frac{\eta_{ini}}{M} \right)^n \ln r \right] \quad (8)$$

$$D = \exp \left[\frac{\kappa}{\lambda - \kappa} \ln \left(\frac{M}{2S_p \sqrt[n]{n \ln r}} \right) \right] \quad (9)$$

En la Figura 1 se presenta la influencia de los parámetros n y r sobre la superficie de fluencia, en donde n controla la forma de curva en el plano $p' - q$ del lado “húmedo” de la superficie, y r controla la intersección con la línea de estado crítico.

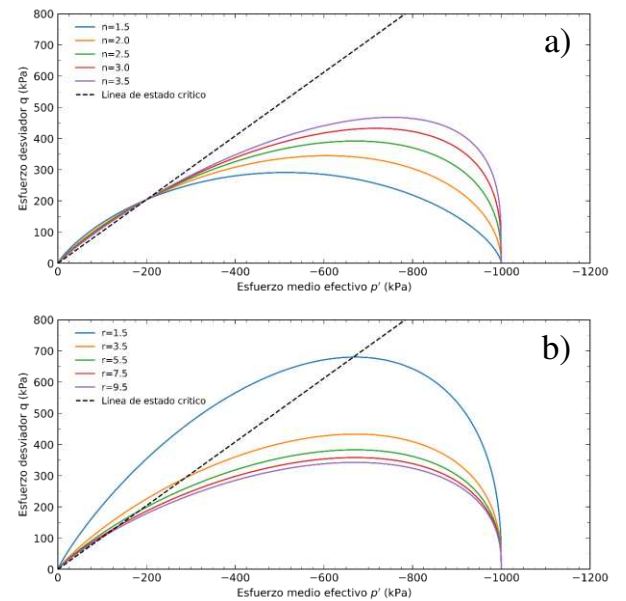


Figura 1. a) Influencia del valor del coeficiente esfuerzo-estado (n), b) influencia del valor de la relación de espaciamento (r) en la superficie de fluencia (Castillo 2023).

3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica de los relaves de hierro localizados en el reservorio de la presa fue basada en campañas de ensayos de campo y laboratorio por caracterización física convencional (índices) y especiales tales como el ensayo de refracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (MEB). En la Figura 2 se presenta los resultados del ensayo MEB, en donde se observa la predominancia de partículas laminares menores y partículas subredondeadas a subangulares sin una evidente cementación entre ellas. De la misma forma, los relaves también fueron caracterizados mecánicamente, por medio de ensayos triaxiales convencionales y de consolidación unidimensional, así como por ensayos *Bender Element*, para correlación de sus parámetros de deformabilidad.

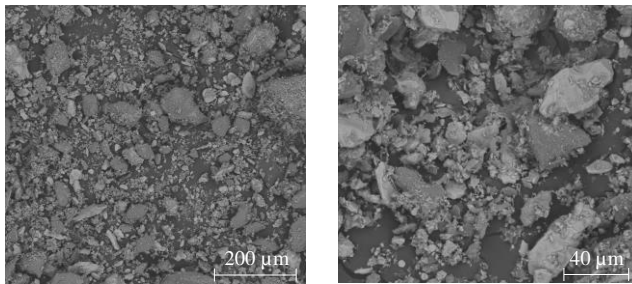


Figura 2. Ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido a 200 µm y 40 µm

3.1 Caracterización física

Los ensayos índices mostraron que los relaves presentan un porcentaje medio de finos de 81%, contenido de agua promedio del 11.5%, sin plasticidad y una gravedad específica promedio de 3.4. Los ensayos químicos (refracción de rayos X) revelaron una predominancia de Cuarzo del 48% y Hematita del 29%, lo cual podría indicar el alto valor de gravedad específica debido al hierro presente. El ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido evidenció la ausencia de características de cementación en la estructura de las muestras extraídas.

3.2 Caracterización mecánica

Fueron realizados nueve ensayos de consolidación isotrópica de compresión triaxial en condiciones drenadas (07) y no drenadas (02) para muestras remodeladas de relave a diferentes índices de vacío inicial, e_i , (desde una condición suelta a una más densa) con el objetivo de poder determinar los parámetros de entrada asociados al marco de referencia de la teoría del estado crítico. Las 09 muestras fueron preparadas con el método *Moist Tamping* con contenidos de agua que variaron de 8.94% a 12.19%, gravedad específica de sólidos de 3.30, saturación (S_r) de 49.70% a 78.20%, y parámetro de Skempton B entre 0.97 y 0.99.

En la Figura 3 se presenta los resultados de los ensayos realizados en el espacio $p' - e$, en donde se observa que tres muestras (BE01, TX02 y TX07) no alcanzaron el estado crítico a pesar de haber sido sometidas a deformaciones axiales cerca del 30% y tener condiciones iniciales distintas, como requerido para la definición de la CSL (*Critical State Line*). Para el caso de los relaves analizados, los ensayos, en su condición de máxima deformación axial, se ajustaron con mayor precisión a la forma exponencial de la CSL, mientras que pocos ensayos se ajustaron a la forma logarítmica (para un rango intermedio de presión de

confinamiento). Esta tendencia pudo verse reflejada también en las calibraciones numéricas de los ensayos de laboratorio con ambos modelos constitutivos.

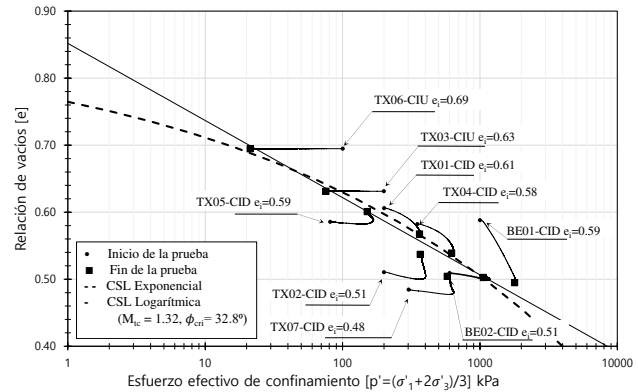


Figura 3. Línea de estado crítico en el espacio $p' - e$ para muestras remodeladas.

4 CALIBRACIÓN NUMÉRICA

4.1 Parámetros de entrada

Actualmente, el modelo NorSand y CASM vienen siendo ampliamente usados en la práctica de la ingeniería geotécnica para la simulación numérica de materiales contráctiles, como es el caso de los relaves para proyectos mineros. La principal ventaja de ambos modelos es que pueden ser calibrados a partir de pruebas de campo y laboratorio convencionales.

Debido a que ambos modelos son basados en la teoría del estado crítico, los parámetros relacionados a la CSL pueden ser determinados llevando a cabo una serie de ensayos de compresión triaxial en condiciones drenadas y no drenadas para diferentes relaciones de vacío.

Para la determinación de los parámetros elásticos del modelo NorSand, Jefferies *et al.* (2016) sugieren realizar ensayos de laboratorio de columna resonante o *Bender Element*, así como ensayos de campo que permitan propagar señales de velocidades de ondas de corte a fin de obtener relaciones mejor controladas. Si bien es cierto, el coeficiente de Poisson puede estimarse con ensayos de laboratorio especiales, también puede ser asumido ya que no tiene gran impacto en la calibración numérica. De igual forma, los parámetros plásticos, pueden ser calibrados empleando los procedimientos sugeridos por el autor. No obstante, para algunos materiales, los ajustes entre los resultados experimentales y la representación numérica puede no ser tan fidedigna. Por ejemplo, la Figura 4 muestra algunas tendencias que podrían ser incorporadas dentro de la selección de parámetros de endurecimiento para estos materiales. Las líneas punteadas en gris en la figura indican el límite inferior y superior de estas tendencias. Evidentemente, esta variación afecta directamente a los parámetros obtenidos; sin embargo, un análisis crítico debe ser considerado durante ese proceso de calibración evaluando los parámetros de mayor sensibilidad e impactos en los resultados numéricos. En la Tabla 1 y Tabla 2 se presentan los resultados de las calibraciones con el modelo NorSand y CASM, respectivamente, para relaves de hierro, con el uso de la herramienta SoilTest de PLAXIS FE.

Tabla 1. Parámetros de entrada calibrados del modelo NorSand.

Elasticidad	G_{ref} (MPa)	70
	p_{ref} (kPa)	100
	n_G (-)	0.785
	ν (-)	0.20
	M_{tc} (-)	1.32
Línea de estado crítico	Γ (-)	0.852
	λ (-)	0.05
	a (-)	0.865
	b (-)	0.235
	c (-)	0.185
Plasticidad	N (-)	0.20
	χ_{tc} (-)	5.63
	H_0 (-)	70
	H_ψ (-)	500

Tabla 2. Parámetros de entrada calibrados del modelo CASM.

Elasticidad	κ (-)	0.06
	ν (-)	0.20
Línea de estado crítico	M_{tc} (-)	1.32
	Γ (-)	1.852 ^{Nota 01}
	λ (-)	0.05
Plasticidad	n (-)	1.20 – 3.86
	r (-)	1.80 – 9.70
	m (-)	2.847
	OCR	1.0

Nota 01: En términos de volumen específico ($v = 1 + e$)

4.2 Calibraciones numéricas

Las calibraciones de los parámetros de los modelos NorSand fueron realizadas principalmente para el ajuste de los parámetros H_0 (endurecimiento plástico inicial) y H_ψ (endurecimiento plástico en función del parámetro de estado). Mientras que para el modelo CASM, los parámetros manipulados en las calibraciones fueron los parámetros n y r .

En la Figura 5 se muestran los resultados de las calibraciones de dos ensayos triaxiales en condiciones no drenadas (muestras Tx03 y Tx05). En términos de deformación axial – presión de poros, $\varepsilon_a - u$, ambos modelos representaron coherentemente la tendencia y valores máximos alcanzados a partir de deformaciones superiores a 5%. Por otro lado, el comportamiento esfuerzo-deformación, $\varepsilon_a - q$, de las simulaciones numéricas, no consiguieron capturar los picos máximos para sus respectivos niveles de deformación (entre 2% y 3%), representando al material más rígido a comparación de la muestra. De la misma forma, la resistencia residual se encuentra sobreestimada para las calibraciones hechas con el NorSand Logarítmica y CASM. El modelo NorSand con ajuste exponencial se presenta como una alternativa más adecuada para reproducir la resistencia a niveles de deformaciones mayores. Así mismo, las trayectorias de esfuerzos no drenadas, $p' - q$, también pudieron ser mejor representadas con el modelo NorSand con ajuste exponencial.

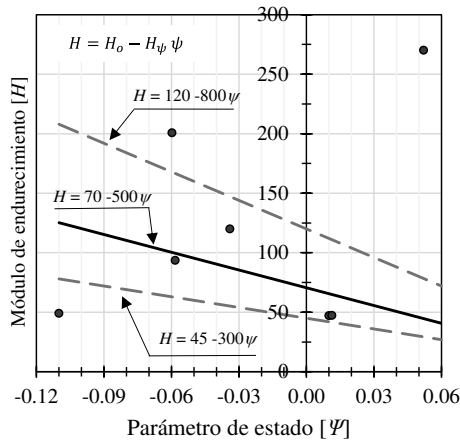


Figura 4. Rango de variación del módulo de endurecimiento para las muestras de relave de hierro.

Los parámetros elásticos para el modelo CASM pueden ser obtenidos a partir de ensayos de consolidación unidimensional con ciclos de carga y descarga, con la finalidad de hallar la pendiente de la rama de recompresión, κ , en el espacio $\ln p' - e$. De igual forma que para el modelo NorSand, el coeficiente de Poisson puede ser asumido. En cuanto a los parámetros plásticos, n y r , Mánica *et al.* (2022) proponen un procedimiento iterativo para la estimación exacta de estos parámetros, bajo el supuesto que los materiales se encuentran normalmente consolidados, como es el caso común de los relaves mineros. Además, de acuerdo con Yu (2006), el valor de n generalmente se encuentra entre 1 y 5, y el valor de r puede variar desde 1 al infinito.

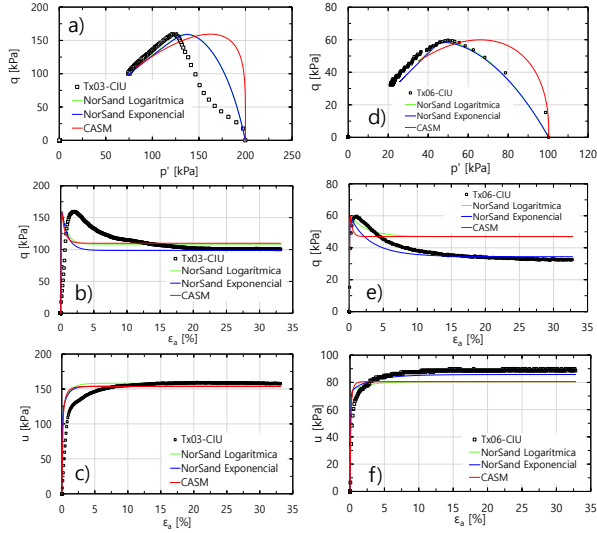


Figura 5. Calibración de las muestras Tx03 y Tx06 en condiciones no drenadas con los modelos constitutivos NorSand y CASM.

Para los ensayos triaxiales drenados (Figura 6), ambos modelos consiguieron representar la tendencia de los comportamientos esfuerzo-deformación, trayectoria de esfuerzos y deformaciones volumétricas versus deformación axial de las muestras, siendo que la opción exponencial del modelo NorSand que captura con mayor precisión el comportamiento contráctil de estas muestras de relave.

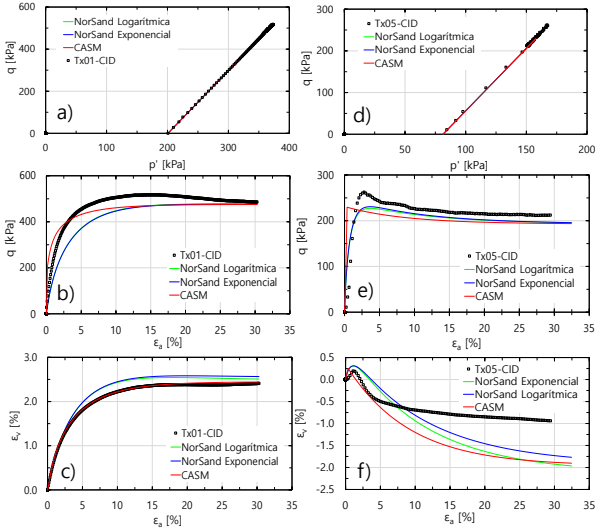


Figura 6. Calibración de las muestras Tx01 y Tx05 en condiciones drenadas con los modelos constitutivos NorSand y CASM.

5 MODELO NUMÉRICO

5.1 Condición inicial

La condición inicial de los relaves fue evaluada mediante ensayos piezocono sísmico (sCPTu), ejecutados en la región del embalse de la estructura, a fin de representar el estado actual de estos materiales a través del parámetro de estado, ψ_o , estimado por medio de la metodología propuesta por Robertson (2010), como se muestra en la Figura 7.

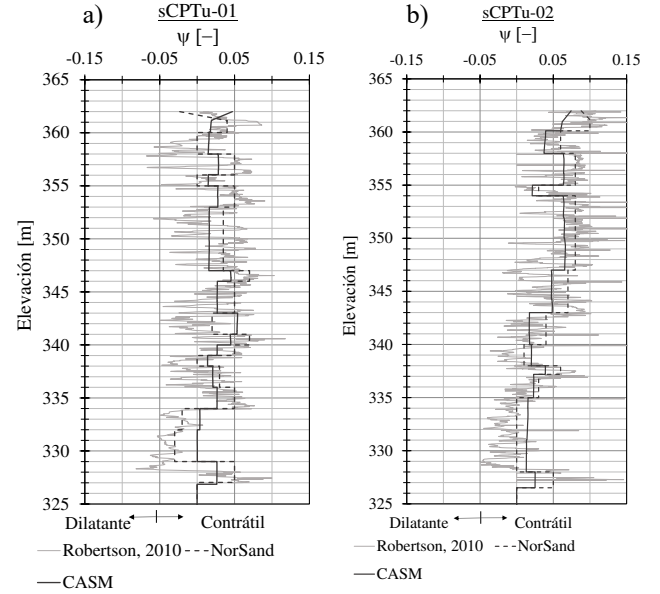


Figura 7. Caracterización del estado *in situ* de los relaves a partir del parámetro de estado, con base en ensayos sCPTu.

En la etapa inicial simulada se indica el estado del material por medio de la razón de esfuerzos normalizada (η/M_θ), antes del inicio de cualquier intervención dentro del depósito, como se presenta en la Figura 8. Esta razón indicaría que los relaves se encuentran cerca de la zona de inestabilidad, la cual está definida como la región comprendida entre la línea de estado crítico, M_{tc} , y la línea de inestabilidad teórica ($0.7M_{tc}p'$), conforme lo sugerido por Jefferies *et al.* (2016).

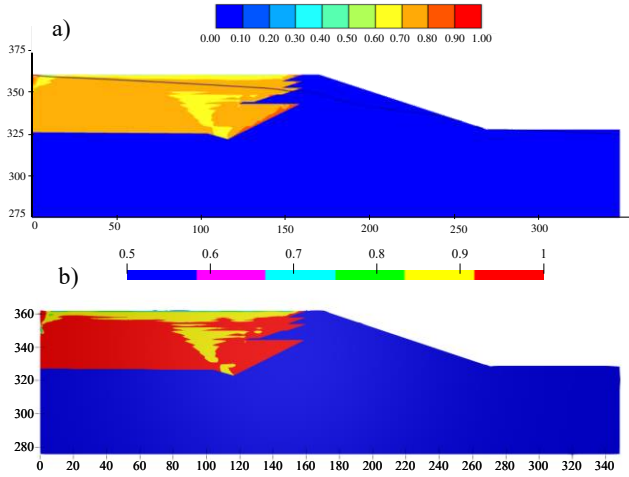


Figura 8. Razón de esfuerzos normalizada, η/M_θ , para la condición inicial. a) Modelo NorSand exponencial, b) modelo CASM.

De la misma forma, los ensayos sCPTu indicaron que el material presentaría una condición anisotrópica de esfuerzos, por tanto, para la condición inicial fueron adoptados valores de K_0 comprendidos entre 0.4 y 0.5, estimado acorde a lo propuesto por Jaky (1944) y conforme se muestra en la Figura 9.

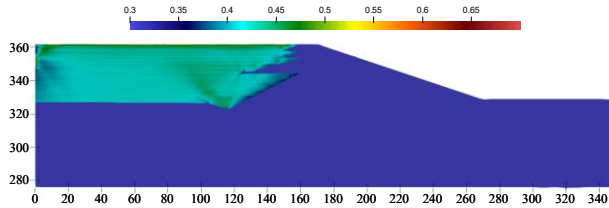


Figura 9. Coeficiente de tierras en reposo, K_0 , para la condición inicial para el NorSand y CASM.

Es posible observar que los parámetros adoptados por ambos modelos constitutivos para los análisis numéricos consiguieron representar adecuadamente la condición inicial de campo. Esto se verifica al comparar las correlaciones del ψ_0 del ensayo sCPTu con los resultados numéricos, así como los perfiles de velocidad de onda S, en función de estos sCPTu, indicando que existe una buena adherencia de los parámetros inicialmente calibrados.

La Figura 10 presenta también el campo de deformaciones máximas de corte de la estructura para su condición inicial, es decir, antes de cualquier intervención o estudio de escenarios. Es posible observar que la condición crítica es gobernada por los suelos de fundación (material aluvional y suelos residuales contráctiles) aguas abajo, al pie de la estructura.

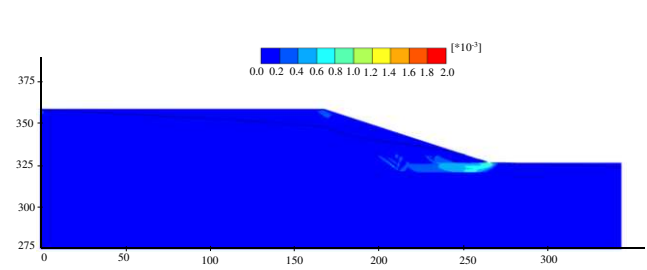


Figura 10. Deformaciones de corte máxima, para la condición inicial, antes de cualquier intervención.

5.2 Escenarios de análisis

Se han seleccionado algunos escenarios para analizar el inicio de licuación estática de estos relaves; como por ejemplo durante la colocación de algún material en superficie, actividades de excavación respondiendo a procesos descaracterización.

5.2.1 Carga

Este escenario incorpora una carga vertical de 50 kPa en la región estructurante sobre los relaves del reservorio por un periodo de consolidación de 20 días para este caso de análisis (ver Figura 11), la cual podría representar la disposición de un material, depósito de material inerte a manera de almacén temporal, recrecimientos e inclusive la ejecución de trabajos sobre la cresta del depósito, los cuales impactarían en el relave contráctil.

5.2.2 Descarga

El escenario de excavación recrea la descarga o remoción de relave en la región superficial del embalse, como parte de alguna actividad minera, por ejemplo, procesos de descaracterización.

En los últimos años, especialmente después de las fallas catastróficas, se ha enfatizado la necesidad de tener un plan de acción para todas las presas de relave, especialmente aquellas que enfrentan un inminente colapso. El gobierno brasileño ha propuesto llevar a cabo un proceso de remoción de relaves como parte de su programa de descaracterización para todas las estructuras construidas con el método aguas arriba.

La Figura 11 presenta un esquema de los escenarios evaluados, los cuales fueron simulados con el uso de ambos modelos constitutivos, NorSand y CASM. En esta misma figura, se ilustra la posición de tres puntos de control de esfuerzos para verificar la posición inicial y final de la condición del material en algunas regiones del depósito.

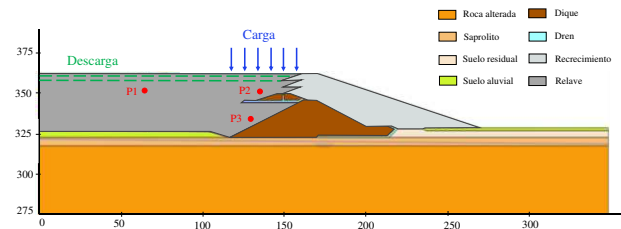


Figura 11. Esquema de escenarios evaluados.

5.3 Resultados obtenidos

La Figura 12 presenta los resultados de los escenarios para el modelo de NorSand, en términos de razón de esfuerzo normalizada η/M_θ , para la condición de carga (Figura 12a) y descarga (Figura 12b).

Los resultados del escenario de carga (Figura 12a) indican que los relaves cerca de la zona estructurante experimentarían el fenómeno de licuación de flujo, lo cual demuestra que la colocación de algún material sobre la superficie de los relaves podría desfavorecer la condición en esta zona, próxima a la estructura, generando regiones de altos esfuerzos y deformaciones de corte, los cuales podrían repercutir en una potencial falla. Por otro lado, la Figura 12b muestra que, para el caso de implantación de una excavación, la condición de los relaves sería menos crítica y permitiría realizar las actividades afines.

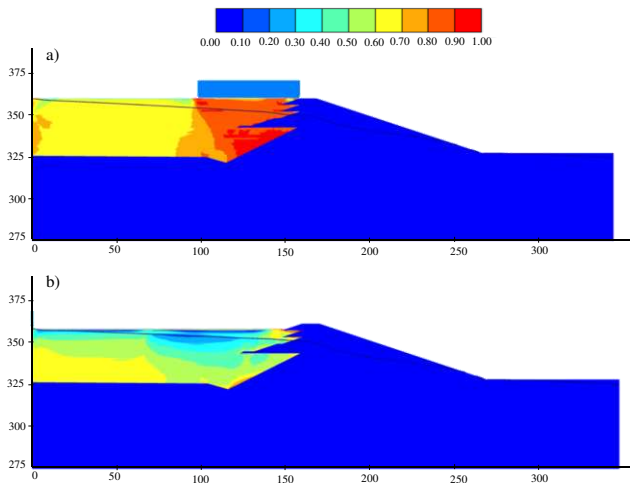


Figura 12. Razón de esfuerzo normalizada del modelo NorSand, η/M_θ . a) Escenario de carga, b) Escenario de descarga.

Los desplazamientos verticales observados al final de cada escenario indican para ambos modelos constitutivos se alcanza un máximo de 20 cm, mientras que, para el escenario de la excavación, estos desplazamientos tienden a ser despreciables.

Para el caso del CASM, puesto que se encuentra implementado como USDM, se limita la exportación de algunos resultados como la razón de esfuerzo normalizada η/M_θ dentro del entorno de PLAXIS *Ultimate Output*; sin embargo, esto podría ser superado empleando herramientas de visualización complementarias como Paraview. No obstante, a partir de los puntos de control de esfuerzos (Figura 11), es posible extraer el estado de esfuerzo y realizar dicha evaluación.

En la Figura 13 y 14 se observa que el relave en su condición inicial ya se encontraba próximo a la zona de inestabilidad, con un $\eta/M_\theta \approx 0.7$. Luego de los escenarios simulados, estos esfuerzos indicaron que, para el caso de la carga, el material se aproxima a su estado crítico (Figura 13), mientras que, para el caso de la descarga, estos esfuerzos se alejaron de la zona de inestabilidad (Figura 14).

En la Figura 13, el estado de esfuerzos de los puntos de control P1 y P3, mostraron que el material aún se encontraría dentro de la zona de inestabilidad ante una carga en la región estructurante para

ambos modelos. Sin embargo, para el caso del P2, el ajuste exponencial del NorSand mostró un mayor aumento en la tensión media efectiva, p' , a diferencia del CASM, lo cual genera que el estado de esfuerzos se desplace fuera de la zona de inestabilidad, evidenciando ser menos conservador.

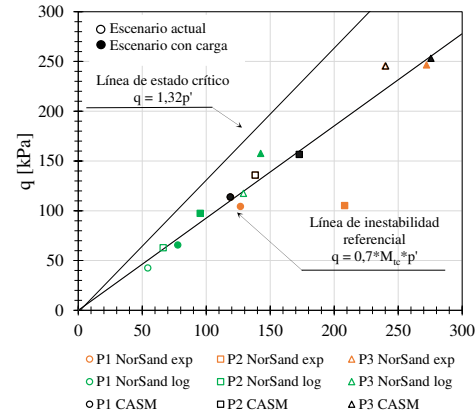


Figura 13. Estado de esfuerzos en los puntos de control para el escenario *in-situ* y carga.

En la Figura 14, los dos ajustes de la línea de estado crítico para el modelo constitutivo NorSand mostraron el mismo cambio de comportamiento para el caso de descarga (se alejan de la zona de inestabilidad); sin embargo, el efecto en términos de variación de esfuerzos es distinto en cada uno de ellos. En ambos casos existe una reducción de esfuerzos desviadores, siendo mayor para el caso del ajuste exponencial. Además, para el enfoque logarítmico, los resultados mostraron un aumento considerable de la presión media efectiva, p' , y el ajuste exponencial mostró apenas una leve disminución, mostrando ser más conservador para el ajuste exponencial. Las trayectorias de esfuerzos, para el caso de descarga, mostraron que la mayoría de los puntos evaluados salen de la zona de inestabilidad, reflejando que para este escenario ambos modelos constitutivos consiguieron representar adecuadamente el comportamiento mecánico de descarga.

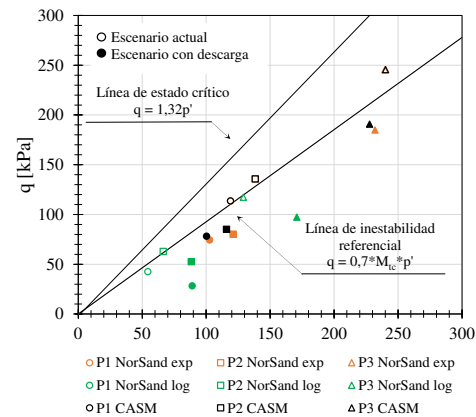


Figura 14. Estado de esfuerzos en los puntos de control para el escenario *in-situ* y descarga.

7 CONCLUSIONES

De forma general ambos modelos constitutivos mostraron ser capaces de representar el comportamiento contráctil de los materiales para evaluar las zonas con mayor potencial de licuación estática. Durante el proceso de calibración de los parámetros de los modelos constitutivos, se pudo observar que el modelo NorSand con ajuste exponencial representó de una manera más adecuada las curvas de laboratorio de los ensayos triaxiales, tanto para la condición drenada como no drenada para el caso de estos relaves de hierro.

Por otro lado, la determinación de los parámetros del CASM requirió de una menor cantidad de ensayos de laboratorio y menor esfuerzo para su determinación gracias al procedimiento iterativo indicado. Con relación a los parámetros y número de variables de ambos modelos, el NorSand requiere de una mayor cantidad para su calibración numérica. No obstante, es importante resaltar que para el caso del CASM se encuentra implementada una extensión que considera el efecto viscoso en suelos.

En comparación con la convergencia numérica de estos DLL, fue evidenciada algunas dificultades con el uso del *solver* iterativo que usan estos *scripts* para resolver el sistema de ecuaciones no lineales. En particular, para el caso del CASM, el esfuerzo computacional fue mayor que para el NorSand, en el intento de conseguir una convergencia numérica.

Ambos modelos constitutivos fueron capaces de determinar las zonas con potencial de licuación de flujo. Por lo tanto, se sugiere a los usuarios verificar cuál de los modelos se ajusta mejor a sus curvas experimentales.

8 AGRADECIMIENTOS

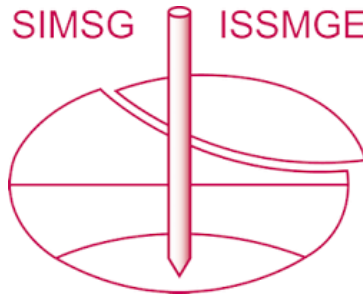
Agradecimiento a Klohn Crippen Berger LAM por el apoyo en la elaboración de este artículo y al Dr. Miguel Mánica, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por compartir el archivo DLL y en la orientación de su uso.

9 REFERENCIAS

- Bentley. 2022. User Defined Soil Models – NorSand: An Elasto-plastic model for soil behaviour with static liquefaction. *Plaxis, Connect Edition V22.00*.
- Castillo M. 2023. Implementación del modelo constitutivo CASM para el análisis del fenómeno de licuación estática en las plataformas de código abierto MFront y OpenGeoSys [Tesis de Maestría, UNAM]. *Repositorio Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México*. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000850118>.
- Gens A. 2019. Hydraulic fill with special focus on liquefaction. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings*, 52–82.
- Jaky J. 1944. The coefficient of earth pressure at rest. In Hungarian (A nyugalmi nyomás tényezője). *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineering*, 355–358.
- Jefferies M. 1993. Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1), pp.
- Jefferies M., Been K. 2016. Soil Liquefaction. A critical state approach, segunda edición. *CRC Press, Taylor & Francis Group*.
- Mánica M., Arroyo M. y Gens A. 2022. Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*.

- Robertson P. 2010. Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, CA, USA, Mayo 2010.
- Robertson P. 2010. Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, Junio 2010.
- Roscoe K., Schofield A. y Wroth C. 1958. On the yielding of soils. *Géotechnique*, 8(1), 22–53.
- Yu H. 1998. CASM: a unified state parameter model for clay and sand". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(8):621–653.
- Yu H. 2006. Plasticity and geotechnics. *Springer US, New York*.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.