

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**“OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA DE UN MODELO
CONSTITUTIVO PARA EVALUAR LA LICUACIÓN
ESTÁTICA DE RELAVES”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

ELABORADO POR

**ANIBAL ADALBERTO RIOS SOSA
ID 0009-0003-1310-4001**

ASESOR

**Dr. Ing. JORGE LUIS CÁRDENAS GUILLEN
ID 0000-0001-5420-1877**

LIMA – PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Rios Sosa, Anibal Adalberto

anibal.rios.s@uni.pe

965 732 464

Dedicatoria

A mis padres Cecilia – Raúl y a mi hermana por siempre depositar su confianza en mí y brindarme el apoyo incondicional más allá de las adversidades de la vida, ser el origen y fin de mis metas y anhelos profesionales y personales. Asimismo, a mi novia por su soporte diario, confianza, por hacerme recordar y persuadirme que todo es posible por mí.

Agradecimientos

A mis padres, hermana y novia por el apoyo constante durante el desarrollo de la presente investigación, sin su soporte y consejos no habría sido posible culminar la presente tesis de manera exitosa.

A mi casa de estudios superiores, la prestigiosa Universidad Nacional de Ingeniería, a todos mis profesores, compañeros y amigos que he podido compartir y aprender de experiencias, vivencias y enseñanzas a lo largo de mis 10 ciclos académicos estudiados en la Facultad de Ingeniería Civil.

A mi asesor Dr. Jorge Cárdenas, por animarse a dictar cursos avanzados para un nivel de pregrado, por darse siempre el tiempo a responder consultas y enseñar a sus alumnos de manera didáctica. Por despertar en mí la curiosidad en los modelos constitutivos y la modelación numérica, asimismo, ser el empuje final de mi elección por la ingeniería geotécnica. Finalmente, por el apoyo, enseñanza y guía constante para el desarrollo de la presente tesis, sin su aceptación inicial y apoyo durante toda esta investigación no habría sido posible culminarlo.

A mi co-asesor PhD. Franklin Olaya, por tener la iniciativa de asesorar a alumnos en investigaciones asociadas a ingeniería geotécnica conjuntamente con el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC) y haber sido uno de sus seleccionados. Por su empatía, predisposición a enseñar, facilidad de explicación y por el desprendimiento de enseñar lo aprendido en su ya admirable carrera profesional. Además, por su guía, orientación constante y brindar ideas innovadoras durante la realización de la presente tesis, sin su guía constante y soporte continuo no habría sido posible terminarlo con éxito.

A toda mi familia, mis amigos y compañeros cercanos que he formado durante mi vida y en especial a los obtenidos en mi estadía en la Universidad Nacional de Ingeniería, por las alegrías, consejos, enseñanzas y buenos momentos vividos; este paso importante en mi carrera y vida también es parte de ellos.

Muchas gracias UNI; estoy seguro que más pronto que tarde estaremos viéndonos y desde donde me toque trataré de retribuir todo lo que me has brindado.

Índice

Resumen	5
Abstract	6
Prólogo	7
Lista de Tablas	8
Lista de Figuras	9
Lista de Símbolos y Siglas	12
Capítulo I: Introducción	16
1.1. Generalidades	16
1.2. Problemática	17
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo General	17
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. Hipótesis	18
1.5. Antecedentes referenciales	18
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	20
2.1. Licuación de materiales granulares	20
2.1.1. Definición	20
2.1.2. Licuación estática	20
2.1.3. Licuación cíclica	21
2.2. Depósito de relaves	21
2.2.1. Relaves mineros	22
2.2.2. Clasificación por material del dique	22
2.2.3. Clasificación por método de recrecimiento del dique	23
2.2.4. Fallas recientes de depósitos de relaves por licuación estática ..	24
2.3. El ensayo triaxial	25

2.3.1.	Concepto	25
2.3.2.	Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente drenado 'CID'	26
2.3.3.	Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente no drenado 'CIU' ...	26
2.4.	Teoría de estado crítico	27
2.4.1.	Estado crítico de un material	27
2.4.2.	Superficie de estado crítico 'CSL'	28
2.4.3.	Parámetro de estado ' ψ '	30
2.4.4.	Respuesta del suelo ante deformaciones cortantes	31
2.4.5.	Superficie de inestabilidad de licuación de flujo 'FLS'	33
2.5.	Modelo constitutivo	34
2.5.1.	Motivación	34
2.5.2.	Modelos constitutivos estáticos y dinámicos	35
2.5.3.	Modelos constitutivos para evaluar licuación estática	35
Capítulo III: Modelo constitutivo optimizado		38
3.1.	Modelo constitutivo base propuesto por Gutiérrez M. y Verdugo R. (1995)	38
3.1.1.	Asunciones del modelo	38
3.1.2.	Deformación volumétrica plástica ε_v^p	39
3.1.3.	Variación de la relación de esfuerzos ' n ' con la deformación de corte plástico ε_s^p	40
3.2.	Modificaciones del modelo base propuesto por Cárdenas J. (2004) ...	42
3.2.1.	Modificación del módulo de deformación volumétrica inicial B_0 ...	42
3.2.2.	Modificación del módulo de la pendiente inicial G_0	43
3.2.3.	Modificación de la variación de la relación de esfuerzos dn	43
3.2.4.	Variación de la presión de poros du	43
3.3.	Optimización del modelo constitutivo propuesto en la presente tesis .	44
3.3.1.	Actualización de la variación de la relación de esfuerzos dn	45
3.3.2.	Optimización de la variación del esfuerzo efectivo medio dp'	46

3.3.3.	Actualización de la variación de la presión de poros du	48
3.3.4.	Inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última.....	48
3.4.	Procedimiento del cálculo general.....	49
3.4.1.	Formulaciones principales del modelo	49
3.4.2.	Diagrama de flujo del modelo	51
3.4.3.	Implementación numérica del modelo constitutivo	52
3.4.4.	Algoritmo del modelo constitutivo optimizado	53
Capítulo IV: Calibración y validación del modelo optimizado.....		54
4.1.	Parámetros independientes del modelo.....	54
4.1.1.	Parámetros Independientes.....	54
4.1.2.	Definición de rangos típicos de los parámetros independientes..	55
4.2.	Materiales de relave a modelar	55
4.2.1.	Información general de las muestras de relave.....	56
4.2.2.	Propiedades geotécnicas estándar de los materiales de relave..	56
4.2.3.	Ensayos triaxiales drenados y no drenados ensayados en los relaves	57
4.3.	Determinación de parámetros en el estado crítico.....	58
4.3.1.	Valores geotécnicos importantes en estado crítico basados en ensayos triaxiales en los materiales de relave.....	58
4.3.2.	Estado crítico de los materiales de relave.....	59
4.4.	Calibración del modelo constitutivo para los relaves evaluados	61
4.4.1.	Determinación de parámetros que calibran el modelo constitutivo..	61
4.4.2.	Set de parámetros calibrados del modelo constitutivo	63
4.4.3.	Salidas del modelo constitutivo calibrado	63
Capítulo V: Modelación de licuación estática.....		66
5.1.	Determinación de la superficie de inestabilidad	66
5.2.	Modelación de licuación estática	69

Capítulo VI: Análisis de resultados.....	71
6.1. Comportamiento contractivo frágil.....	71
6.2. Ensayos triaxiales en el estado crítico.....	71
6.3. Calibración del modelo constitutivo	73
6.4. Determinación de la superficie de inestabilidad	76
6.5. Modelación de licuación estática.....	77
Conclusiones.....	78
Recomendaciones.....	80
Referencias bibliográficas.....	81
Anexos	88
Anexo 1: Ensayos triaxiales drenados y no drenados de las muestras de relave evaluadas.....	88

Resumen

La licuación estática es un fenómeno donde una masa de suelo de naturaleza granular y sin cohesión pierde su resistencia al corte de manera súbita. Cuando este fenómeno es desarrollado dentro de una estructura de gran envergadura como un depósito de relaves puede generar pérdidas catastróficas.

Los modelos numéricos utilizan como matriz principal un modelo constitutivo geotécnico que por medio de sus formulaciones pueda capturar el comportamiento de un material bajo la acción de esfuerzos y evaluar la ocurrencia de fenómenos complejos como la licuación estática.

La presente tesis propone la optimización del modelo constitutivo originalmente desarrollado por Gutiérrez, M., Verdugo R., (1995) y luego modificado por Cárdenas, J. (2004).

El modelo optimizado incluyó los esfuerzos en el estado crítico como condición última y se determinó rangos típicos para los parámetros. Asimismo, se utilizaron ensayos triaxiales drenados y no drenados que llegaron al estado crítico, con comportamientos contractivos frágiles en condición no drenada para la calibración y evaluación del modelo constitutivo para capturar la licuación estática en relaves. Para la calibración del modelo optimizado se define la superficie de estado crítico y utiliza parámetros característicos en este estado. Se calibraron cuatro relaves por medio de un código en Python abarcando 120 000 sets de parámetros.

El modelo optimizado propuesto en la presente tesis ha demostrado poder capturar y representar adecuadamente la licuación estática de relaves y ha sido calibrado en base de ensayos triaxiales drenados y no drenados, asimismo, se ha definido un rango típico para los parámetros del modelo.

Palabras clave: Optimización numérica, modelo constitutivo, licuación estática, superficie de inestabilidad, estado crítico y comportamiento frágil.

Abstract

Static liquefaction is a phenomenon where a soil mass of granular nature and without cohesion suddenly loses its resistance to cutting. When this phenomenon is developed within a large-scale structure such as a tailings dump, it can generate catastrophic losses.

The numerical models use as main matrix a geotechnical constitutive model that, by means of its formulations, can capture the behavior of a material under the action of stresses and evaluate the occurrence of complex phenomena such as static liquefaction.

This thesis proposes the optimization of the constitutive model originally developed by Gutiérrez, M., Verdugo R., (1995) and later modified by Cárdenas, J. (2004).

The optimized model included critical stress as ultimate condition and typical ranges for parameters were determined. In addition, critical-state, non-drained and drained triaxial tests with fragile contractile behaviors under undrained conditions were used for the calibration and evaluation of the constitutive model to capture static liquefaction in tailings.

For the calibration of the optimized model, the critical state surface is defined and characteristic parameters in this state are used. Four tailings were calibrated using a Python code covering 120,000 sets of parameters.

The optimized model proposed in this thesis has been shown to be able to adequately capture and represent the static liquefaction of wastes and has been calibrated on the basis of drained and non-drained triaxial tests. Also, a typical range for model parameters has been defined.

Keywords: Numerical optimization, constitutive model, static liquefaction, instability surface, critical state and brittle behavior

Prólogo

Esta tesis presenta la optimización de un modelo constitutivo orientado al estudio de licuación estática para materiales granulares como los relaves mineros. La optimización del modelo constitutivo se da en dos aspectos principales: (1) se ha mejorado la formulación del módulo de endurecimiento del modelo de tal manera que éste reproduce adecuadamente las tasas de cambio de los esfuerzos desviadores con respecto a la tasa de corte aplicada; y (2) se han determinado los rangos típicos entre los cuales varían los parámetros independientes del modelo constitutivo. El desempeño del modelo constitutivo optimizado se ha verificado empleando resultados de ensayos triaxiales no drenados para distintas muestras de relaves mineros preparadas a diferentes densidades y consolidadas a distintas presiones.

El fenómeno de licuación estática es complejo de estudiar y su ocurrencia es difícil de predecir en ingeniería práctica. Particularmente en la industria minera, la falla de numerosas presas de relaves ha sido atribuida a la licuación de relaves ubicados en zonas estructurales de la presa de contención. Por tal motivo, la profesión geotécnica necesita de herramientas que faciliten la evaluación del potencial de licuación de relaves mineros. El desarrollo de la presente tesis se enmarca en este contexto y se presenta como una alternativa para el análisis de las condiciones de densidad y carga que podrían desencadenar en licuación de relaves.

En la tesis se ha descrito con detalle el desarrollo de las ecuaciones constitutivas, las condiciones y data de los ensayos empleados para las calibraciones y los procedimientos de optimización seguidos. De igual manera se resaltan las limitaciones del modelo y se identifican las oportunidades para futuras investigaciones empleando el modelo constitutivo presentado. De esta manera los resultados obtenidos en esta tesis pueden ser empleados por futuros investigadores.

Jorge Cárdenas, Dr., Ing. – Asesor
Franklin Olaya, PhD., Ing. – Co-asesor

Lista de Tablas

Tabla 2-1: Fallas de depósitos de relaves por licuación estática en el siglo XXI	24
Tabla 4-1: Información general de las muestras de relave	56
Tabla 4-2: Propiedades geotécnicas estándar de los relaves	56
Tabla 4-3: Propiedades geotécnicas de los relaves obtenidos de ensayos triaxiales CID y CIU ¹	57
Tabla 4-4: Propiedades de los relaves en el estado crítico basados en ensayos triaxiales CID y CIU	58
Tabla 4-5: Parámetros y superficie que describen el comportamiento de los relaves en el estado crítico	59
Tabla 4-6: Steps, rangos típicos y número de iteraciones de los parámetros independientes calibrados	63
Tabla 4-7: Parámetros calibrados del modelo para cada uno de los relaves evaluados	63
Tabla 6-1: Valores importantes calibrados del modelo optimizado de los relaves evaluados	74

Lista de Figuras

Figura 2-1: Partes generales de un depósito de relaves.	21
Figura 2-2: Tipos de construcción o recrecimiento de las presas de materiales sueltos.	24
Figura 2-3: Comportamiento de ensayos triaxiales no drenados, Castro (1969)..	28
Figura 2-4: Trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado drenado para diferentes esfuerzos de confinamiento.....	29
Figura 2-5: Trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado no drenado para diferentes esfuerzos de confinamiento.....	30
Figura 2-6: Definición del parámetro de estado ψ	31
Figura 2-7: Curva de estado crítico o línea de estado de estable, criterio de estado para la susceptibilidad de licuación de flujo.	32
Figura 2-8: Trayectorias típicas de esfuerzos de un suelo en el plano $q - e$	33
Figura 2-9: Trayectoria de esfuerzos en los planos $q - e$ y $p' - q$ de un material frágil en condiciones no drenadas. Punto A: Inicio del esfuerzo cortante; Punto B: Inicio del desencadenamiento de la licuación de flujo y Punto C: Estado crítico del material.....	33
Figura 2-10: La línea que une los puntos x en el plano $p' - q$ determina la Superficie de desencadenamiento de la licuación de flujo (FLS) de un material frágil en condiciones no drenadas.....	34
Figura 4-1: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M1	60
Figura 4-2: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M2	60
Figura 4-3: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M3	61
Figura 4-4: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M4	61
Figura 4-5: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M1	64

Figura 4-6: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M2	64
Figura 4-7: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M3	65
Figura 4-8: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M4	65
Figura 5-1: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M1	67
Figura 5-2: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M2	67
Figura 5-3: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M3	68
Figura 5-4: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M4	68
Figura 5-5: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M1	69
Figura 5-6: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M2	70
Figura 5-7: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M3	70
Figura 5-8: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M4	70
Figura 6-1: Estado crítico de la muestra del relave Te-AR-2024-M1 en las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$	72
Figura 6-2: Estado crítico de la muestra del relave Te-AR-2024-M3 en las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$	73
Figura 6-3: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M1	74
Figura 6-4: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M2	75
Figura 6-5: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M3	75

Figura 6-6: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te- AR-2024-M4	76
--	----

Lista de Símbolos y Siglas

α	:	Parámetro adimensional del material.
β	:	Parámetro adimensional del material.
Γ	:	Altura de CSL, definida para 1 kPa.
$\Delta\varepsilon_{1q_f \rightarrow q_{min}}$	:	Variación de la deformación axial de $q_f \rightarrow q_{min}$.
ε_1	:	Deformación axial vertical.
ε_1^f	:	Deformación axial vertical máxima.
ε_s^p	:	Deformación de corte plástico.
ε_v^p	:	Deformación volumétrica plástica.
λ_e	:	Pendiente de CSL en $p' - e$, definida en logaritmo natural.
σ'_1	:	Esfuerzo efectivo principal mayor.
σ'_3	:	Esfuerzo efectivo principal menor.
σ'_c	:	Esfuerzo de confinamiento.
φ'_{cs}	:	Ángulo de fricción del material en el estado crítico.
a	:	Variable adimensional.
b	:	Variable adimensional.
B	:	Módulo de deformación volumétrica.
B_0	:	Módulo de deformación volumétrica inicial, $p' = \sigma'_c$.
B_s	:	Parámetro adimensional del material.
B_u	:	Parámetro adimensional del material.
$B_{u_{max}}$	:	Valor máximo permitido del parámetro B_u .
C_p	:	Parámetro en unidad de presión (kPa) del material.
$C_{p_{max}}$	:	Valor máximo permitido del parámetro C_p .
CSL_{LAB}	:	Línea de estado crítico determinada en base de ensayos de laboratorio ejecutados en el material de relave.
$d\varepsilon_1^p$	:	Variación de la deformación axial vertical plástica.
$d\varepsilon_3^p$	:	Variación de la deformación transversal horizontal plástica.
$d\varepsilon_s^p$	:	Incremento de la deformación de corte plástico.
$d\varepsilon_{s_{max_{LAB}}}^p$	:	Valor máximo de $d\varepsilon_s^p$ en base a la deformación máxima registrada en los ensayos triaxiales CIU ejecutados en el material.
$d\varepsilon_v^p$	:	Variación de la deformación volumétrica plástica.
$d\varepsilon_{vp}^p$	:	Variación de $d\varepsilon_v^p$ debido a p' .

$d\varepsilon_{vd}^p$	:	Variación de $d\varepsilon_v^p$ debido a la dilatación.
$des_{i_{p'-q}}$	:	Sumatoria de desviación cuadrática calculada por el modelo constitutivo optimizado en la iteración i en el campo $p' - q$.
$des_{i_{q-\varepsilon}}$	:	Sumatoria de desviación cuadrática calculada por el modelo constitutivo optimizado en la iteración i en el campo $q - \varepsilon$.
$des_{i_{u-\varepsilon}}$	:	Sumatoria de desviación cuadrática calculada por el modelo constitutivo optimizado en la iteración i en el campo $u - \varepsilon$.
des_{TOTALi}	:	Sumatoria de $des_{i_{p'-q}}$, $des_{i_{q-\varepsilon}}$ y $des_{i_{u-\varepsilon}}$.
$d\sigma'_3$	:	Variación del esfuerzo efectivo principal menor.
dn	:	Variación de la relación de esfuerzos.
$dn_{i_{MODEL}}$	:	dn calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
dp'	:	Variación del esfuerzo efectivo medio.
$dp'_{i_{MODEL}}$	:	dp' calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
dp	:	Variación del esfuerzo total medio.
dq	:	Variación del esfuerzo desviador.
du	:	Variación de la presión de poros.
$du_{i_{MODEL}}$	:	du calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
dx_i	:	Variación de la variable x en la posición i .
e_i	:	Relación de vacíos en la posición i .
e_{CS}	:	Relación de vacíos en el estado crítico.
G	:	Pendiente inicial en el plano $n - \varepsilon_s^p, \varepsilon_s^p = 0$.
G_0	:	G para $p' = \sigma'_c$.
G_r	:	Parámetro adimensional del material.
G_u	:	Parámetro adimensional del material.
$G_{u_{max}}$	:	Valor máximo permitido del parámetro G_u .
i	:	Número de posición de un parámetro.
i_{final}	:	Última posición de un parámetro.
ln	:	Logaritmo natural o neperiano.
m	:	Parámetro adimensional del material.
M_{LAB}	:	Matriz de datos de ensayos triaxiales de laboratorio ejecutados en el material de relave.

m_{max}	:	Valor máximo permitido del parámetro m .
M_{MODEL}	:	Matriz de datos generados por el modelo constitutivo optimizado a lo largo de todas las iteraciones realizadas.
$\min(des_{TOTAL_i})$	:	Mínimo valor de todos los valores de des_{TOTAL_i} .
n	:	Relación esfuerzos.
n_{cs}	:	Relación de esfuerzos en el estado crítico.
n_i	:	Parámetro n , en la posición i .
n_{iMODEL}	:	n calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
n_{i+1}	:	Parámetro n , en la posición $i + 1$.
$n_{iteración}$	:	Numero de iteraciones ejecutadas por el modelo.
n_f	:	Relación de esfuerzos en la resistencia máxima, $q = q_{max}$.
$n_{fiMODEL}$	:	n_f calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
p	:	Esfuerzo total medio.
p'	:	Esfuerzo efectivo medio.
p'_{cs}	:	Esfuerzo efectivo medio en el estado crítico.
p'_i	:	p' en la posición i .
p'_{iMODEL}	:	p' calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
p'_{i+1}	:	p' en la posición $i + 1$.
p'_{min}	:	Esfuerzo efectivo medio mínimo.
p'_{qf}	:	Esfuerzo efectivo medio para q_f .
P_a	:	Presión atmosférica, 101.3 kPa.
q	:	Resistencia cortante o esfuerzo desviador.
q_{cs}	:	Resistencia cortante o esfuerzo desviador en el estado crítico.
q_f	:	Resistencia cortante o esfuerzo desviador máximo.
q_i	:	q en la posición i .
q_{iLAB}	:	q obtenido de ensayos de laboratorio para la misma deformación ε_1 del valor q_{iMODEL} .
q_{iMODEL}	:	q calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
q_{min}	:	Resistencia mínima o residual o esfuerzo desviador mínimo.

r	:	Parámetro adimensional del material.
s	:	Parámetro adimensional del material.
u_1	:	Parámetro adimensional del material.
u_2	:	Parámetro adimensional del material.
u_f	:	Presión de poros máximo o pico.
u_i	:	u en la posición i .
$u_{i_{LAB}}$	:	u obtenido de ensayos de laboratorio para la misma deformación ε_1 del valor $u_{i_{MODEL}}$.
$u_{i_{MODEL}}$	:	u calculado en la iteración i generado por el modelo constitutivo optimizado.
u_{i+1}	:	u en la posición $i + 1$.
x_1	:	Parámetro adimensional del material.
$x_{1_{max}}$	:	Valor máximo permitido del parámetro x_1 .
x_2	:	Parámetro adimensional del material.
x_i	:	x en la posición i .
x_{i+1}	:	x en la posición $i + 1$.
CASM	:	Clay and Sand Model.
CCR	:	Concreto compactado con rodillo.
CID	:	Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente drenado.
CIU	:	Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente no drenado.
CSL	:	Critical State Line.
FLS	:	Flow Liquefaction Surface.
ICOLD	:	International Commission on Large Dams.
O/f	:	Overflow.
Set	:	Grupo.
U/f	:	Underflow.
UU	:	Ensayo triaxial no consolidado no drenado.

Capítulo I: Introducción

1.1. Generalidades

El fenómeno de licuación estática o también llamada licuación de flujo es un fenómeno súbito donde el material pierde su resistencia casi completamente y sufre grandes deformaciones a altas velocidades.

Este fenómeno es actualmente estudiado mediante ensayos de laboratorio, investigaciones de campo y mediante modelos constitutivos debido a que su ocurrencia depende tanto del estado de esfuerzos in-situ del suelo, como de factores externos (cargas de gravedad). Por tanto, la evaluación de este fenómeno requiere el análisis de las trayectorias de esfuerzos y deformaciones que se espera sean impuestas a la estructura geotécnica. A pesar de los avances a la fecha, aún existe una necesidad de modelos constitutivos que capturen el fenómeno de licuación, particularmente se requieren modelos que estén basados en la teoría de estado crítico (Jefferies, M., & Been, K., 2015)

El fenómeno de licuación estática se ha observado recientemente en varios depósitos de relaves alrededor del mundo, como por ejemplo en las presas Merriespruit (Sudáfrica, 1994), Fundão (Brasil, 2015) y Feijão (Brasil, 2019); en Perú en la última década no ha ocurrido este fenómeno con pérdidas de estas envergaduras, sin embargo, el Perú cuenta con 113 depósitos de relaves (Gamarra, M., M., & Gil, Y., L., 2015) y están ubicados en zonas donde se producen lluvias que mantienen el material suelto saturado, por lo que este fenómeno podría ocurrir y generar pérdidas humanas, daños a infraestructuras, al medio ambiente y pérdidas económicas.

Evaluar y analizar el fenómeno de licuación estática por medio de un modelo constitutivo que tiene la capacidad de describir el comportamiento esfuerzo-deformación, incluyendo la correcta acumulación de presión de poros de los relaves depositados es importante y hasta necesario de realizarse. Esto debido a que es una metodología confiable que permite evaluar este tipo de fenómenos, a través de un análisis por métodos numéricos que tiene como input la secuencia constructiva de la estructura geotécnica y los escenarios de falla creíbles.

1.2. Problemática

Comúnmente la evaluación del fenómeno de licuación estática está basada en metodologías empíricas y aproximadas que consideran la estimación de la resistencia residual para ser utilizadas en la estimación del factor de seguridad postsismo, dejando de lado la trayectoria de esfuerzos resistentes hasta antes de llegar a la falla. En tal sentido el uso adecuado de los modelos constitutivos que permitan representar la trayectoria de los esfuerzos desde el inicio de las cargas hasta la condición de falla son bastante útiles en el análisis de previsión del fenómeno de licuación estática. La implementación de un modelo constitutivo en la formulación de un modelo numérico representa la estimación adecuada de deformaciones y esfuerzos como solución numérica, utilizado para tal, técnicas numéricas como elementos finitos, diferencias finitas y otros.

La aplicación de un modelo constitutivo en un análisis geotécnico, entre muchas variables, está asociado tanto al tipo de fenómeno a evaluar, al tipo de suelo y al efecto de los esfuerzos actuantes, de tal manera que se represente adecuadamente el comportamiento esfuerzo–deformación. En tal sentido, es importante el conocimiento de la formulación numérica de los modelos constitutivos, así como su optimización numérica para la determinación de los parámetros del modelo y poder representar adecuadamente el fenómeno de licuación estática en distintos espacios como trayectoria de esfuerzos, curvas de esfuerzo–deformación, historia de generación de presión de poros, entre otros.

El fenómeno de licuación estática genera que la estructura geotécnica experimente grandes deformaciones y pueda fallar; causando grandes daños humanos y ambientales, principalmente en estructuras geotécnicas como depósitos de relaves que son usualmente construidas en la industria minera.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Optimizar numéricamente un modelo constitutivo para la simulación de la licuación estática de relaves mediante técnicas numéricas, inclusión y actualización de formulaciones definiendo rangos típicos de valores para los parámetros del modelo en base a resultados de ensayos de laboratorio.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última y modificación de las formulaciones del modelo constitutivo para capturar correctamente la variación de la relación de esfuerzos, variación del esfuerzo efectivo medio y variación de la presión de poros.
- Implementación de un procedimiento de optimización numérica mediante la creación de un código en lenguaje de programación Python para determinar los parámetros del modelo constitutivo.
- Estimación de los parámetros que calibran el modelo constitutivo en base a data de ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente drenados y no drenados de relaves. Asimismo, determinación de rangos típicos de valores admisibles para los parámetros independientes del modelo constitutivo.
- Generación de trayectorias de esfuerzos, esfuerzos–deformación y presión de poros–deformación, que representan el comportamiento de licuación estática de relaves por medio del modelo constitutivo estudiado.

1.4. Hipótesis

El modelo constitutivo optimizado tiene la capacidad de evaluar la licuación estática de relaves en base al comportamiento de trayectoria de esfuerzos, esfuerzos–deformación y presión de poros–deformación.

1.5. Antecedentes referenciales

Históricamente se han producido muchas fallas en presas de tierra y relave, que fueron causadas por la licuación de arenas y relaves debido a cargas estáticas y dinámicas generadas por terremotos. Cuando se produce el fenómeno de licuación, la resistencia del suelo disminuye sustancialmente debido a la generación de excesos de presión de poros que desestabilizan la configuración interna del suelo, originando que las estructuras que se encuentran cimentadas en estos suelos o relaves se inclinen o deslicen, produciendo grandes deformaciones. La literatura registra varias evidencias del fenómeno de licuación bajo carga estática o monotónica en depósitos de relaves, tales como Merriespruit (Sudáfrica, 1994), Mount Polley (Canadá, 2014), Fundão (Brasil, 2015) y Brumadinho (Brasil, 2019).

Los ensayos de laboratorio triaxiales ayudan a representar el comportamiento de un suelo o relave bajo acción de esfuerzos, por ello, es importante aprovechar en su totalidad los datos que estos proporcionan. El aprovechamiento de la data experimental puede llevarse a cabo mediante el uso de modelos constitutivos, los cuales representan el comportamiento del material en términos de trayectoria de esfuerzos, esfuerzo–deformación y presión de poros–deformación. En la actualidad el análisis de los problemas geotécnicos puede enfocarse mediante tres ejes importantes: ensayos in situ y de laboratorio, análisis mediante modelos empíricos y modelización numérica; en esta última, los modelos constitutivos son necesarios y ayudan a representar el comportamiento que tendrá un material bajo acción de esfuerzos estáticos y/o dinámicos.

Los modelos constitutivos en materiales vienen siendo estudiados desde mediados del siglo veinte con el objetivo de poder representar el comportamiento del suelo bajo la acción de cargas estáticas y/o dinámicas, además de su implementación en modelos numéricos de solución de problemas geotécnicos específicos usando técnicas numéricas como elementos finitos, diferencias finitas, entre otros.

En la actualidad, el modelo constitutivo más utilizado para evaluar la licuación estática es NorSand (1993) ,el cual está inspirado en el modelo constitutivo Cam Clay Modificado (1968); el modelo contempla la teoría de mecánica de suelos en estado crítico en su formulación, asimismo, tiene la capacidad de capturar el efecto de la variación de la relación de vacíos en el comportamiento del material; fue inicialmente concebida para materiales arenosos, sin embargo, puede también puede ser extrapolada y utilizarse en otros materiales.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1. Licuación de materiales granulares

2.1.1. Definición

La licuación es uno de los tópicos más retadores y estudiados en la ingeniería geotécnica sísmica. Sus efectos catastróficos pusieron en la palestra cuando ocurrió los sismos de Alaska y Niigata Japón en el año de 1964. Estos sismos muestran los efectos provocados por licuación de suelos, generando fallas de taludes, cimentaciones, infraestructura y flotación de estructuras.

La licuación es el fenómeno donde se pierde la resistencia al corte de una masa de suelo sin cohesión en estado suelto bajo condiciones saturadas y sin drenaje debido al exceso de la presión de poros provocados por cargas monotónicas o cíclicas. Se dividen en dos tipos, licuación estática y licuación cíclica.

2.1.2. Licuación estática

También denominada licuación de flujo; ocurre cuando el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas en una masa de suelo con baja resistencia residual, es decir, el esfuerzo de corte estático es mayor que la resistencia al corte de la masa de suelo en estado licuado. La licuación estática produce las consecuencias más dramáticas de los fenómenos relacionados con la licuación, grandes inestabilidades conocidas como falla de flujo, estas se caracterizan por su origen súbito, gran velocidad y las grandes distancias que la masa de suelo se desplaza (Kramer, S. L., 1996).

La licuación de flujo puede ocurrir en cualquier suelo saturado o casi saturado, como arenas y limos muy sueltos sin cohesión, así también, arcillas muy sensibles que se encuentren en un estado suelto de consistencia. En caso de que una estructura falle por este fenómeno, la masa de suelo se moverá grandes distancias de acuerdo a las características del suelo y la geometría de la estructura. Estos movimientos son resultado de tensiones internas inducidas por la gravedad y suelen ocurrir después de que inicie el mecanismo de activación.

2.1.3. Licuación cíclica

También denominada movilidad cíclica; este fenómeno produce deformación progresiva de suelos saturados bajo cargas cíclicas o dinámicas. Sucede cuando el esfuerzo de corte estático es menor a la fuerza de corte del suelo en estado licuado. Uno de los efectos generalmente observados es el deslizamiento lateral en masas de suelo planas o levemente inclinadas.

La licuación estática ocurre con menos frecuencia que la movilidad cíclica, sin embargo, sus efectos son mucho más graves. Por otro lado, la movilidad cíclica puede ocurrir bajo un rango mucho más amplio del suelo y condiciones del sitio, sus efectos pueden ser desde insignificantes hasta altamente dañinos.

Asimismo, es importante reiterar que la generación del exceso de presión de poros es la razón para el desarrollo de la licuación, de no existir un incremento de presión de poro no ocurriría la falla de flujo, ni movilidad cíclica.

2.2. Depósito de relaves

Los depósitos de relaves son estructuras geotécnicas de gran envergadura que se construyen en la industria minera para retener residuos mineros de la explotación, los cuales principalmente conforman el embalsamiento de relaves.

El depósito de relaves consiste principalmente de dos partes importantes, el dique y el embalse, este último también llamado vaso o cubeta (ver Figura 2-1).

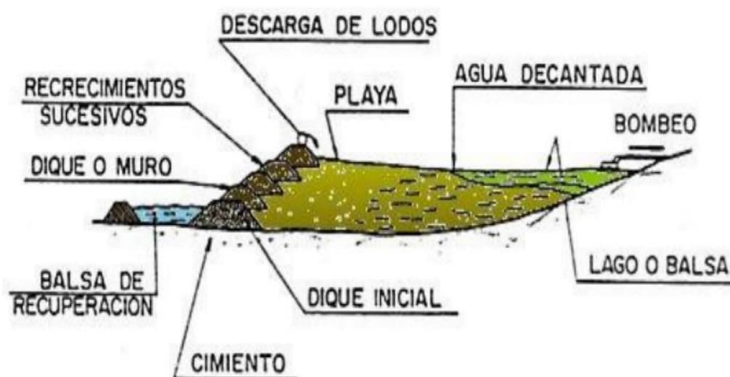


Figura 2-1: Partes generales de un depósito de relaves. Fuente: Hinojosa, P. A. (2022)

El Perú al ser un país con una gran industria minera cuenta con estas grandes estructuras a lo largo y ancho de su territorio, tiene en total 113 depósitos de relaves (Gamarra, M., M., & Gil, Y., L., 2015).

Los depósitos de relaves se dividen principalmente por el tipo de material del dique: dique de concreto, dique de relaves cicloneado y dique de material suelto. Asimismo, por el tipo de construcción o recrecimiento de presa: aguas arriba, línea central y aguas abajo.

2.2.1. Relaves mineros

Los relaves mineros son desechos o residuos que se generan de la extracción del mineral valioso y están constituidos por una mezcla de rocas trituradas, agua y minerales de ganga (poco valioso). En la mayoría de los proyectos de extracción minera se generan estos residuos, los cuales se deben almacenar en un depósito de relaves, ello origina la necesidad de diseños y construcción de los depósitos de relaves (Reinoso G., P., & Olalla M., C., 2017). Los relaves mineros tienen una composición en términos generales limo-arenosos.

2.2.2. Clasificación por material del dique

Los diques clasificados según el tipo de material principalmente son:

- Dique de concreto

Dique conformado por concreto, es una combinación de arena, grava, cemento y agua; asimismo, también pertenece a este grupo la presa de concreto compactado con rodillo (CCR); estas presas generalmente son esbeltas en comparación a las presas de relaves y de material suelo. Este tipo de presas usualmente son usadas en la industria hidroeléctrica o hidráulica y con menor medida en la industria minera.

- Dique de relaves cicloneado

El relave al pasar por un proceso de cicloneo, se obtiene relaves gruesos también llamados underflow (u/f) y relaves finos o lamas también llamados overflow (o/f); los relaves gruesos sirven para construir el dique y las lamas se colocan en el vaso del depósito de relaves en zonas cercanas al talud aguas arriba del mismo. Estas presas son más anchas que las presas de concreto, asimismo, son usadas exclusivamente en la industria minera.

- Dique de material de préstamo

Dique conformado por materiales como suelos y/o enrocados seleccionados de acuerdo a un diseño ingenieril, este tipo de dique son generalmente muy usados en la industria minera e hidráulica, para que sea factible la construcción de este tipo de presas, se debe tener cerca o de fácil acceso a canteras de los materiales a usar para la construcción de la presa.

2.2.3. Clasificación por método de recrecimiento del dique

Los métodos de recrecimiento o tipos de construcción de una presa de material suelto (suelo, enrocado y/o relave) principalmente son:

- Recrecimiento aguas arriba

Este tipo de recrecimiento el dique va creciendo hacia aguas arriba de la presa, es decir hacia el embalse, usando como punto base la corona o cresta del dique en su etapa inmediatamente anterior. Este tipo de presas tienen menor volumen para su construcción en comparación con el recrecimiento de línea central y aguas abajo (ver Figura 2-2); sin embargo, es la que tiene menor estabilidad física, por ello, en Perú, Chile y otros países están prohibidos construir siguiendo este tipo de recrecimiento.

- Recrecimiento línea central

Este tipo de recrecimiento, el dique sigue una línea central y crece el dique aguas arriba y mayoritariamente aguas abajo, usando como punto base la corona del dique en su etapa inmediatamente anterior. Este tipo de presas son las que tienen un volumen y estabilidad física media en comparación con el recrecimiento del tipo aguas arriba y aguas abajo (ver Figura 2-2).

- Recrecimiento aguas abajo

Este tipo de recrecimiento, el dique crece enteramente aguas abajo, usando como punto base la corona del dique en su etapa inmediatamente anterior. Este tipo de presas son las que tienen mayor volumen y estabilidad física en comparación con el recrecimiento aguas abajo y línea central (ver Figura 2-2).

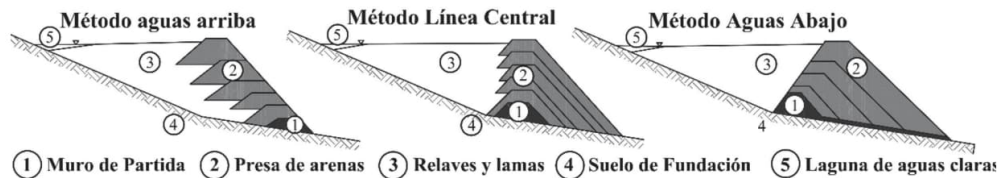


Figura 2-2: Tipos de construcción o recrecimiento de las presas de materiales sueltos. Fuente: Figueroa, A., Solans, D., Gonzalez, C., Campaña, J. (2017)

2.2.4. Fallas recientes de depósitos de relaves por licuación estática

A lo largo de la historia se han registrado varias fallas de presas de depósitos de relaves a causa del fenómeno de licuación estática.

Estos sucesos causaron muchas pérdidas de vidas humanas, materiales y un impacto negativo en el medio ambiente.

En la última década se han registrado fallas por licuación estática en depósitos de relaves, los cuales son: Fundão en Brasil (2015), Louyang en China (2016), Cadia en Australia (2018) y Feijão en Brasil (2019).

En la Tabla 2-1 resume el detalle de las fallas por licuación estática y sus consecuencias originadas (World Information Service on Energy, 2024).

Tabla 2-1: Fallas de depósitos de relaves por licuación estática en el siglo XXI

Fecha	Nombre, País	Mineral explotado	Tipo de Falla	Consecuencias
2015	Fundão, Brasil	Hierro	Falla de la presa en su estribo izquierdo. Una capa de relaves finos presente dentro del embalse de relaves gruesos produjo una zona débil a lo largo de la cual inició la falla.	Flujo total combinado fue de 62 millones de m ³ de relaves. El flujo de relaves inundó la ciudad de Bento Rodrigues, al menos 17 personas muertas y 2 desaparecidas; 158 viviendas destruidas; contaminación del océano Atlántico, del Rio Gualaxo y del Rio Doce.
2016	Louyang, China	Bauxita, aluminio	Falla de una presa de relaves de aluminio debido a licuación estática por colocación de	Pueblo totalmente topado en barro rojo por los relaves, alrededor de 300 aldeanos evacuados, muchos animales

			relaves filtrados sobre el depósito.	domésticos y de granja muertos.
2018	Cadia, Australia	Oro, cobre	Falla de la presa de relaves, principalmente debido a la existencia de una capa en la cimentación de baja densidad.	La falla del terraplén da como resultado un avance limitado de material de relaves desde el dique de norte a sur. El avance se contuvo dentro de la presa de relaves del sur. Se movilizó 1,33 millones de m ³ de relaves.
2019	Feijão, Brasil	Hierro	Licuación estática debido a cargas estáticas.	El flujo de relaves devastó la estación de carga de la mina, su área administrativa y dos cuencas de retención de sedimentos más pequeñas; viajó aproximadamente 7 km cuesta abajo hasta llegar a río Paraopeba, destruyendo un puente y extendiéndose a partes de la comunidad local Vila Ferteco. 259 personas murieron y 11 desaparecidas.

2.3. El ensayo triaxial

2.3.1. Concepto

El ensayo triaxial es uno de las pruebas más confiables y disponibles para determinar los parámetros de resistencia cortante de un suelo. En este ensayo se puede variar los esfuerzos actuantes sobre una probeta de suelo en tres direcciones ortogonales (radiales y axial), efectuando mediciones sobre las características mecánicas en forma completa. El espécimen de suelo es revestido con una membrana látex dentro de una cámara a presión, lleva discos porosos en la parte superior e inferior que conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen.

El ensayo triaxial comprende tres etapas: la saturación, consolidación y corte del espécimen. De acuerdo con el tipo de cizallamiento se clasifica en ensayo de compresión y extensión. El de compresión es aquel donde la dimensión original axial del espécimen disminuye y el de extensión aquel en que dicha dimensión aumenta durante el ensayo. Ambos ensayos presentan varias modalidades de

laboratorio que combina la variación del esfuerzo axial con la variación del esfuerzo lateral.

En la etapa de consolidación el espécimen es sometido a una secuencia tensional isotrópica, es decir, el incremento de esfuerzo axial es igual al incremento de esfuerzo radial. Estos ensayos de compresión triaxial convencional utilizan la modalidad de deformación controlada y entregan información sobre la resistencia cortante después de alcanzar la resistencia máxima (Rojas, R. A., 2016).

Es usual llamar a los esfuerzos, principales mayor, intermedio y menor. En los ensayos triaxiales de compresión, el esfuerzo axial siempre es el esfuerzo principal mayor; mientras que, los esfuerzos radiales son el esfuerzo intermedio y menor, y estos son iguales. Existen los siguientes tipos de ensayos triaxiales a compresión: no consolidado no drenados (UU), consolidado isotrópicamente y drenado (CID) y consolidado isotrópicamente y no drenado (CIU).

2.3.2. Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente drenado 'CID'

El ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y drenado sigue la norma ASTM D7181-20 (2020); es un ensayo que también considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte o aplicación del esfuerzo desviador. En la etapa de corte se admite el drenaje y se mide el agua que entra y sale del espécimen, es decir, no se considera la medición de la presión de poros, lo cual solo permite expresar los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte en términos efectivos o drenados; para evitar que se genere exceso de presión de poros y los esfuerzos sean realmente efectivos, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja y debe ser más baja que en el ensayos triaxial CIU.

2.3.3. Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente no drenado 'CIU'

El ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y no drenado sigue la norma ASTM D4767-11 (2020); es un ensayo que considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte o aplicación del esfuerzo desviador. En la etapa de corte no se admite el drenaje, se considera la medición de la presión de poros, lo cual permite expresar los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte en términos totales o no drenados y efectivos

o drenados. Para medir correctamente la presión de poros, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja para que así la presión de poros esté continuamente estabilizada a través de todo el espécimen.

Estos ensayos son utilizados en suelos granulares, también pueden ser aplicados en suelos finos, aunque tardará mucho más tiempo.

2.4. Teoría de estado crítico

2.4.1. Estado crítico de un material

La teoría de estado crítico se originó con el estudio de Casagrande (1936), quién realizó ensayos de corte directo drenado y observó que las arenas sueltas se contraían y las arenas densas se dilataban hasta una misma relación de vacíos para grandes deformaciones, al que denominó relación de vacíos crítico.

Castro (1969) realizó una serie de ensayos triaxiales en condición no drenada, bajo condiciones de carga controlada. Observó tres tipos de comportamientos de esfuerzo – deformación para muestras anisotrópicamente consolidadas como se observan en la Figura 2-3. La muestra muy suelta A alcanzó una resistencia máxima no drenada a una pequeña deformación, luego rápidamente la resistencia disminuyó significativa manteniéndose constante hasta grandes deformaciones, este tipo de comportamiento es contractivo frágil (ver acápite 2.4.4) y es susceptible a presentar el fenómeno de licuación estática.

La muestra densa B inicialmente se contrae y luego dilata, alcanzando una resistencia elevada a grandes deformaciones. Por otro lado, la muestra de densidad media C alcanza una resistencia máxima a bajas deformaciones, luego mientras se va deformando tiene un comportamiento de ablandamiento limitado de resistencia al corte, para luego dilatar aumentando nuevamente la resistencia al corte, este comportamiento de pasar de contractivo a dilatante ocurre en el punto de transformación de fase (Ishihara, K., Tatsuoka, F., & Yasuda, S., 1975), este comportamiento fue denominado licuación limitada.

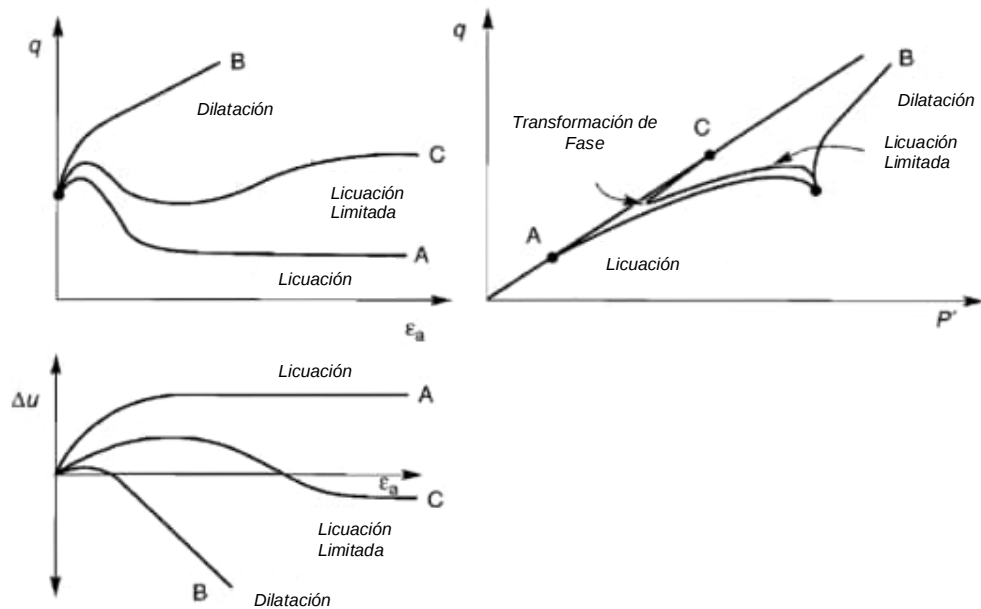


Figura 2-3: Comportamiento de ensayos triaxiales no drenados, Castro (1969). Fuente: Adaptado de Kramer, S. L. (1996).

El estado estacionario identificado por Casagrande (1936), es el estado donde el material se deformaba a esfuerzo, velocidad y volumen constante; luego confirmado por Been, K., Jefferies, M., & Hachey, J., (1991) , siendo generalmente identificados y evaluados en base a ensayos triaxiales isotrópicos a compresión con y sin drenaje, por medio de instrumentación convencional de ensayos triaxiales.

Todo material es capaz de llegar al estado crítico independiente de su condición inicial de densidad, relación de vacíos y humedad. Es definido principalmente por la relación de vacíos (e_{cs}) y esfuerzo efectivo medio (p'_{cs}) en el estado crítico, detallado en el acápite 2.4.2.

El estado crítico da información relevante sobre el comportamiento del suelo, por ejemplo, si un material es susceptible a presentar licuación, en base a su comportamiento al ser sometido a cargas (ver Figura 2-3) y al parámetro de estado (contractivo y dilatante) que es descrito en el acápite 2.4.3 y 2.4.4.

2.4.2. Superficie de estado crítico 'CSL'

La superficie de estado crítico o también critical state line (CSL) en inglés, es aquel lugar geométrico definido por los puntos en el estado crítico p'_{cs} y q_{cs} en el espacio

$p' - q$, asimismo, p'_{cs} y e_{cs} en el espacio semilogarítmico $p' - e$, de todas las muestras de suelo ensayadas por medio de pruebas triaxiales generalmente a compresión isotrópica con y/o sin drenaje. Es importante recordar que un material llega al estado crítico cuando se deforma a esfuerzos, velocidad y volumen constante.

La Figura 2-4 y Figura 2-5 describen como se determina la CSL en los campos $p' - q$ y $p' - e$ en base a ensayos triaxiales a compresión con y sin drenaje; los puntos A_1, A_2, A_3 representan los volúmenes o relación de vacío iniciales después de consolidar para cada presión de confinamiento, estos puntos conforman la curva normal de consolidación (normal consolidation line, NCL por sus siglas en inglés), y los puntos C_1, C_2, C_3 representan los valores finales o críticos de volumen del espécimen en condiciones drenadas (ver Figura 2-4) y en condiciones no drenadas (ver Figura 2-5).

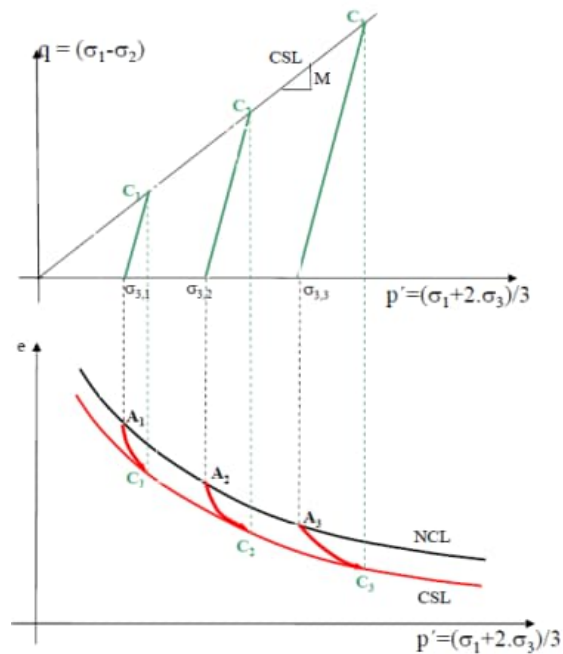


Figura 2-4: Trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado drenado para diferentes esfuerzos de confinamiento.

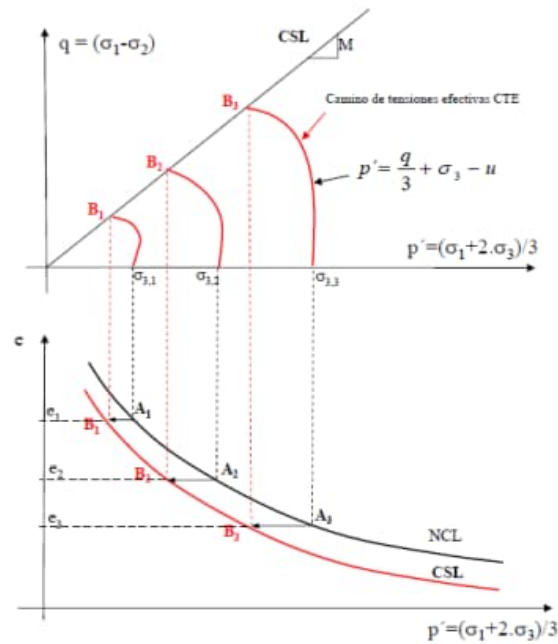


Figura 2-5: Trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado no drenado para diferentes esfuerzos de confinamiento.

2.4.3. Parámetro de estado ' ψ '

La CSL por sí sola no brinda información sobre comportamientos de un material de manera simple bajo esfuerzos y relación de vacíos dados, por ejemplo, relacionado a su densidad y susceptibilidad a la licuación; por ello, Been, K., & Jefferies, M. (1985) definieron un parámetro de estado que pueda dar estas informaciones de manera sencilla, incluso si los materiales inicialmente tiene una misma relación de vacíos y densidad relativa pueden tener comportamientos distintos debido a que el parámetro de estado también involucra el esfuerzo efectivo medio (p') en su determinación del comportamiento contractivo y dilatante de una masa de suelo, lo cual se detalla en el acápite 2.4.3.

El parámetro de estado es determinado bajo la teoría de estado crítico, más exactamente en base a CSL en el campo $p' - e$ y se calcula como la diferencia de la relación de vacíos del material e menos la relación de vacíos en el estado crítico e_{cs} para un esfuerzo de confinamiento dado (ver Figura 2-6).

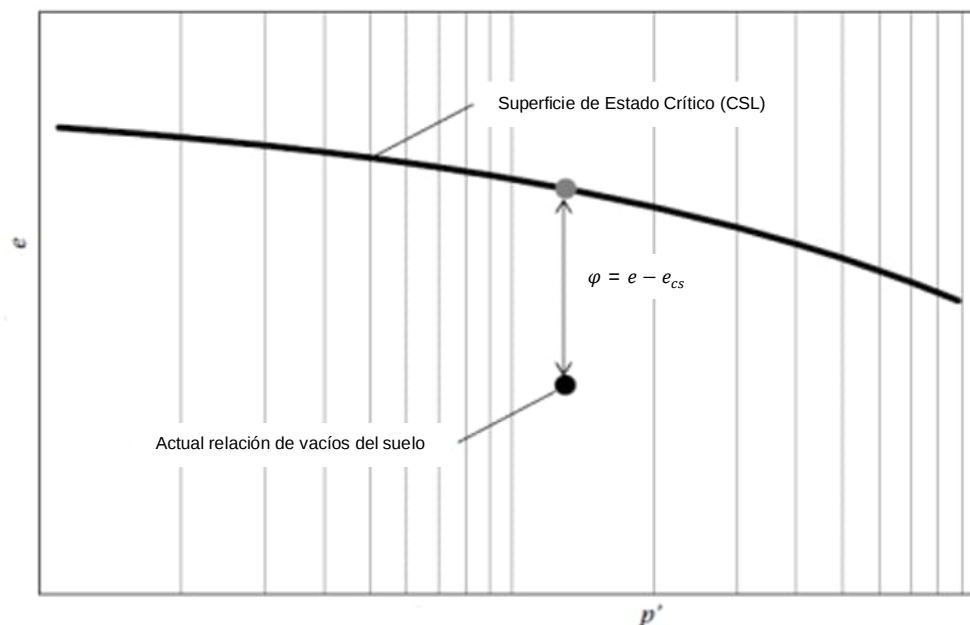


Figura 2-6: Definición del parámetro de estado ψ . Fuente: Adaptado de Jefferies, M., & Been, K. (2015)

2.4.4. Respuesta del suelo ante deformaciones cortantes

Una masa de suelo al ser sometido a esfuerzos cortantes en condiciones no drenadas presenta varios comportamientos, los cuales puede entenderse mejor por medio de la trayectoria de esfuerzos $q - e$, estos comportamientos son importantes comprenderlos debido a que dan una idea de la respuesta del material al ser sometido cargas. Para la presente tesis, principalmente es de interés conocer los comportamientos relacionados a la susceptibilidad a desarrollar el fenómeno de licuación estática, como son el comportamiento contractivo, dilatante y frágil.

- Comportamiento contractivo y dilatante

La determinación del comportamiento contractivo y dilatante de un material se realiza generalmente en base al parámetro de estado, detallado en el acápite 2.4.3.

Si el parámetro de estado es positivo, es decir, por encima de la CSL en el plano $p' - e$, el material tiene un comportamiento contractivo y es susceptible a desarrollar el fenómeno de licuación estática, si, además, el esfuerzo cortante estático excede a su resistencia residual; y si el parámetro de estado es negativo,

es decir, por debajo de la CSL, el material tiene un comportamiento dilatante y no es susceptible a desarrollar licuación estática para el esfuerzo efectivo medio (p') evaluado (ver Figura 2-7).

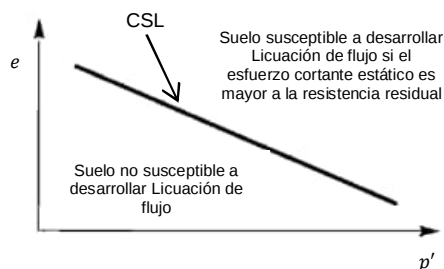


Figura 2-7: Curva de estado crítico o línea de estado de estable, criterio de estado para la susceptibilidad de licuación de flujo. Fuente: Adaptado de Kramer, S. L. (1996).

Asimismo, cuando un material tiene un comportamiento contractivo generalmente es suelo y experimenta un ablandamiento (softening, en inglés) mientras se deforma, es decir, reduce su resistencia luego de alcanzar el pico, como lo muestra las curvas D y E de la Figura 2-8 realizada por el Bulletin N° 194 del International Commission on Large Dams (ICOLD) (2022) ; asimismo, cuando un material tiene un comportamiento dilatante generalmente es denso y experimenta un endurecimiento (hardening, en inglés), es decir, aumenta su resistencia mientras se va deformando, como lo muestra las curvas A y B de la Figura 2-8.

- Comportamiento frágil

El comportamiento frágil es característico de una masa de suelo blanda saturada sometido a cargas estáticas o dinámicas sin drenaje que tiene comportamiento contractivo y de ablandamiento, es decir, luego de llegar a su resistencia máxima (q_f) decae bruscamente como lo muestra la curva F de la Figura 2-8. Este comportamiento es típico de los suelos que son potencialmente susceptibles a desarrollar licuación estática al perder gran parte de su resistencia (q_f) rápidamente. Si una estructura geotécnica importante presenta este comportamiento en alguno de sus materiales principales, es necesario que se evalúe el fenómeno de licuación estática y determinar posibles medidas preventivas.

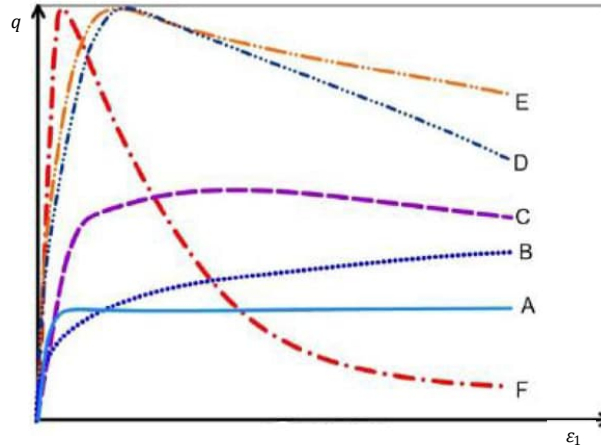


Figura 2-8: Trayectorias típicas de esfuerzos de un suelo en el plano $q - e$. Fuente: Adaptado del Bulletin N° 194 (ICOLD), (2022).

2.4.5. Superficie de inestabilidad de licuación de flujo 'FLS'

La superficie de inestabilidad o desencadenamiento de licuación de flujo (Flow Liquefaction Surface, FLS por sus siglas en inglés) es el límite del estado estable e inestable de la resistencia cortante no drenada de un material contractivo frágil; en simple, si las condiciones de carga alcanzan a la FLS en condiciones no drenadas, se iniciará el desencadenamiento de la licuación de flujo y la resistencia cortante se reducirá hasta llegar a la resistencia en estado crítico (q_{cs}).

La FLS es la línea definida en el plano $p' - q$ por los puntos de resistencia cortante máxima q_f y su respectivo esfuerzo efectivo medio p'_{qf} , para confinamiento efectivo evaluado (ver Figura 2-9 y Figura 2-10).

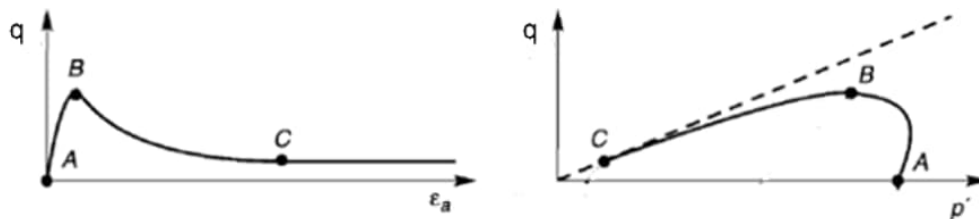


Figura 2-9: Trayectoria de esfuerzos en los planos $q - e$ y $p' - q$ de un material frágil en condiciones no drenadas. Punto A: Inicio del esfuerzo cortante; Punto B: Inicio del desencadenamiento de la licuación de flujo y Punto C: Estado crítico del material. Fuente: Adaptado de Kramer, S. L. (1996).

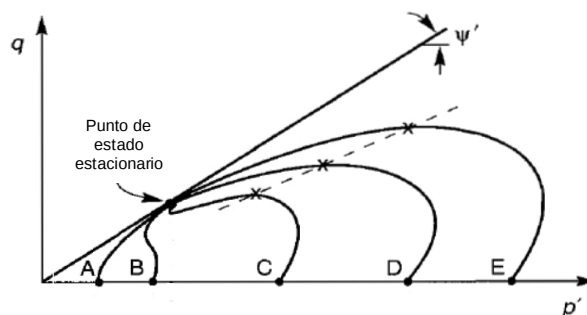


Figura 2-10: La línea que une los puntos x en el plano $p' - q$ determina la Superficie de desencadenamiento de la licuación de flujo (FLS) de un material frágil en condiciones no drenadas.

Fuente: Adaptado de Kramer, S. L. (1996).

2.5. Modelo constitutivo

2.5.1. Motivación

En el contexto de la ingeniería geotécnica actual, con la finalidad de predecir el comportamiento de los suelos sometidos a diferentes tipos de carga surgen los modelos matemáticos, los cuales usan relaciones constitutivas en su formulación. Estos modelos constitutivos presentan relaciones esfuerzo – deformación para caracterizar el material y generalmente se clasifican en modelos estáticos y dinámicos, así también, modelos elásticos y plásticos. Siendo estos modelos constitutivos, matriz fundamental del modelamiento numérico para evaluar comportamientos, esfuerzos, presiones de poros y deformaciones futuras de los materiales que componen una estructura.

Castellón, J. (2013) e Ishihara, K. (1996), consideran que deformaciones menores a $1.0E-3\%$ pertenecen al rango elástico y deformaciones mayores a $1.0E-3\%$ pertenecen al rango plástico.

Es importante conocer las deformaciones que se espera experimenten las estructuras geotécnicas y el fenómeno a analizar, de acuerdo a ello, se determina que modelos constitutivos se usarán para su evaluación, es decir modelos elásticos o plásticos; y de acuerdo al origen de las cargas o esfuerzos que sea sometido la estructura, elegir un modelo constitutivo estático o dinámico que pueda capturar estos comportamientos.

2.5.2. Modelos constitutivos estáticos y dinámicos

Los modelos estáticos evalúan bajo sus formulaciones y relaciones constitutivas esfuerzo – deformación las deformaciones elásticas y/o plásticas que experimentarán las estructuras bajo cargas estáticas, por ejemplo, carga de peso propio, cargas puntuales, distribuidas, entre otras, constantes en dirección y tiempo. Algunos modelos constitutivos estáticos geotécnicos conocidos son:

- Mohr-Coulomb.
- Hiperbólico.
- NorSand

En la práctica actual, los depósitos de relaves en condición estática generalmente son modelados utilizando el modelo Mohr–Coulomb.

De otro lado, los modelos constitutivos dinámicos generalmente son más avanzados, consideran usualmente en sus formulaciones la relación de vacíos, cambios de volumen, densidades relativas y evalúan fenómenos complejos como la movilidad cíclica; asimismo, sus relaciones constitutivas esfuerzo – deformación consideran cargas dinámicas, es decir, variables en tiempo como cargas sísmicas, vientos y/o tsunamis; determinando deformaciones, zonas de licuación, presión de poros, variación volumétrica (por ejemplo, PM4Sand (Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, A. K., 2015).

Algunos modelos constitutivos dinámicos geotécnicos conocidos son:

- Finn–Byrne
- Hardening Soil Small-Strain
- UCBSand
- SaniSand
- P2PSand
- PM4Sand
- PM4Silt

2.5.3. Modelos constitutivos para evaluar licuación estática

En la ingeniería geotécnica profesional y académica actualmente existen algunos modelos constitutivos conocidos, utilizados para evaluar el fenómeno de licuación estática y describir el comportamiento de estos materiales granulares susceptibles a desarrollar este fenómeno.

- NorSand

NorSand (Jefferies, M. G. (1993); Jefferies, M., & Been, K. (2015)) es un modelo basado en la teoría de estado crítico, aplicable a suelos en los que las interacciones entre partículas están controladas por fuerzas de contacto y deslizamientos en lugar de enlaces, incorporando intrínsecamente el parámetro de estado (ψ) de modo que captura el comportamiento de suelos granulares en un amplio rango de esfuerzos de confinamiento y densidades.

Este modelo requiere pocas propiedades del suelo que son familiares y pueden estimarse a partir de ensayos de laboratorio convencionales (triaxiales) o in situ (penetración cónica). NorSand captura con precisión el efecto de la relación de vacíos en el comportamiento del suelo en un rango completo, desde la licuación estática de suelos muy sueltos hasta la dilatación de suelos muy densos; asimismo, tiene la capacidad de representar el comportamiento contractivo y dilatante de los suelos, además, capturar el comportamiento cíclico de arenas.

La principal ventaja de NorSand es la consideración de un parámetro de estado, que es la diferencia entre la relación de vacíos actual del suelo (e) y la de su similar en el estado crítico (e_{cs}). La dilatación o contracción del suelo está entonces relacionada únicamente con el parámetro de estado.

El modelo NorSand en su formulación, considera ley elástica, estado crítico, cambio de fase, parámetro de estado y regla de endurecimiento.

NorSand ha sido usado para evaluar el fenómeno de licuación estática en varios estudios ingenieriles y artículos académicos, evaluando distintas estructuras importantes como algunos depósitos de relaves famosos que han sufrido este fenómeno.

- Clay and Sand Model

Clay and Sand Model (CASM, por sus siglas en inglés) realizado por Yu, H. S. (1998) es un modelo constitutivo basado en el estado crítico, simple y unificado para arcillas y arenas; su formulación está basado en el parámetro de estado (ψ),

el cual mide la distancia vertical de la relación de vacíos actual (e) con la relación de vacíos en estado crítico (e_{cs}) en el espacio $p' - e$.

CASM reformula las ecuaciones del modelo Cam-Clay original y sus modificaciones en términos del parámetro de estado.

El modelo Cam-Clay estándar se ha validado su funcionabilidad para evaluar arcillas normalmente consolidadas, asimismo, es sabido que no puede predecir varias características importantes del comportamiento de arenas y arcillas sobreconsolidadas. CASM determina una relación general entre la relación de esfuerzos (n) y el parámetro de estado (ψ) para describir la superficie límite del estado de los suelos, demostrando que se puede desarrollar un modelo constitutivo unificado simple tanto para arcillas como para arenas.

La característica principal del CASM es su simplicidad y su propuesta de un único set de funciones de fluencia y potencial plástico para modelar el comportamiento de la arcilla y arena bajo condiciones drenadas y no drenadas.

CASM ha sido estudiado y utilizado para evaluar el fenómeno de licuación estática en artículos académicos, por ejemplo, evaluando este fenómeno en la falla de la presa de relaves Merriespruit por parte de Mánica, M. A., Arroyo, M., Gens, A., & Monforte, L., (2022).

Capítulo III: Modelo constitutivo optimizado

3.1. Modelo constitutivo base propuesto por Gutiérrez M. y Verdugo R. (1995)

3.1.1. Asunciones del modelo

El modelo constitutivo base está basado en las siguientes tres (3) asunciones:

- 1) La deformación elástica no es considerada, es decir, las deformaciones totales son enteramente plásticas.
- 2) La variación de la deformación volumétrica plástica, $d\varepsilon_v^p$, es la suma de dos componentes; la primera (1°) debido a la influencia de la variación del esfuerzo efectivo medio, dp' , y la segunda (2°) debido a la dilatación plástica de corte.
- 3) La relación esfuerzos, n , vs. deformación de corte plástico, ε_s^p , es representada por medio de una función hiperbólica, donde el parámetro, G (pendiente inicial en el plano $n - \varepsilon_s^p$, $\varepsilon_s^p = 0$), y el módulo de deformación volumétrica B son modificados de acuerdo al estado de esfuerzos efectivos medios, p' , actuantes en el material.

El modelo es formulado en el plano triaxial y expresado en base a la nomenclatura de Cambridge, en base a σ'_1 , σ'_3 , $d\varepsilon_1^p$, $d\varepsilon_3^p$, p' , q , $d\varepsilon_v^p$, $d\varepsilon_s^p$ y n ; y expresado a través de las siguientes ecuaciones.

Para condiciones del ensayo triaxial, se define:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (1a)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (1b)$$

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_1^p + 2d\varepsilon_3^p \quad (1c)$$

$$d\varepsilon_s^p = \frac{2}{3}(d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p) = d\varepsilon_1^p - \frac{d\varepsilon_v^p}{3} \quad (1d)$$

$$n = \frac{q}{p'} \quad (1e)$$

Siendo:

- | | | |
|-------------|---|------------------------------------|
| σ'_1 | : | Esfuerzo efectivo principal mayor. |
| σ'_3 | : | Esfuerzo efectivo principal menor. |
| p' | : | Esfuerzo efectivo medio. |

- q : Esfuerzo desviador.
 $d\varepsilon_1^p$: Variación de la deformación axial vertical plástica.
 $d\varepsilon_3^p$: Variación de la deformación transversal horizontal plástica.
 $d\varepsilon_s^p$: Incremento de la deformación de corte plástico.

3.1.2. Deformación volumétrica plástica ε_v^p

La $d\varepsilon_v^p$ está constituida por dos componentes:

- El primer componente; es debido a la influencia de p' ; la variación $d\sigma'_3 = 0$ para ensayos triaxiales convencionales.

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{dp'}{B} = \frac{dq}{3B} \quad (2a)$$

Siendo:

- dq : Variación del esfuerzo desviador.
 $d\varepsilon_{vp}^p$: Variación de la deformación volumétrica plástica debido a p' .

Resultados experimentales realizados por Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995) indicaron que B tiene una relación de dependencia exponencial con p' .

$$B = B_0 \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\beta \quad (2b)$$

Siendo:

- B_0 : Módulo de deformación volumétrica inicial, $p' = \sigma_c$.
 σ'_c : Esfuerzo de confinamiento.
 β : Parámetro adimensional del material.

- El segundo componente; es debido a la dilatación plástica que ocurre en materiales granulares (p. ej. relave) que están sometidos al corte. En modelos constitutivos basados en la teoría del estado crítico se usa una

relación esfuerzo–deformación volumétrica dilatante, que siguen una forma similar a la siguiente.

$$d\varepsilon_{vd}^p = (n_{cs} - n)d\varepsilon_s^p \quad (3a)$$

Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995) identificaron que la ecuación (3a) proporcionaba resultados poco precisos en arenas, para valores de relación de esfuerzos, n , bajos; proponiendo una modificación a la ecuación (3a), de la siguiente manera.

$$d\varepsilon_{vd}^p = \frac{n}{n_f} (n_{cs} - n)d\varepsilon_s^p \quad (3b)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{vd}^p & : \quad \text{Variación de deformación volumétrica plástica} \\ & \quad \text{debido a la dilatancia.} \\ n_{cs} & : \quad \text{Relación de esfuerzos en el estado crítico.} \\ n_f & : \quad \text{Relación de esfuerzos en la resistencia máxima,} \\ & \quad q = q_{max}. \end{aligned}$$

Se observa que; $d\varepsilon_{vd}^p = 0$, para una relación de esfuerzos en el estado crítico, $n = n_{cs}$, o para una relación de esfuerzos nula, $n = 0$.

3.1.3. Variación de la relación de esfuerzos ' n ' con la deformación de corte plástico ε_s^p

Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995); consideraron que n_f es dependiente de n_{cs} y p' .

$$n_f = n_{cs} \left(\frac{p'}{p'_{cs}} \right)^m \quad (4a)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} p'_{cs} & : \quad \text{Esfuerzo efectivo medio en el estado crítico.} \\ m & : \quad \text{Parámetro adimensional del material.} \end{aligned}$$

Se observa, que si $p' = p'_{cs}$, entonces $n_f = n_{cs}$; y se mantiene constante para cualquier valor de m .

En el estado crítico; el ángulo de fricción efectivo φ'_{cs} está relacionado con la relación de esfuerzos, n_{cs} , por la siguiente ecuación.

$$n_{cs} = \frac{6 \sin \varphi'_{cs}}{3 - \sin \varphi'_{cs}} \quad (4b)$$

A partir de ensayos de compresión triaxiales no drenados isotrópicos CIU, Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995) concluyeron que la función de dependencia entre n y ε_s^p , puede ser representada por una formulación hiperbólica.

$$n = \frac{\varepsilon_s^p}{a + b \varepsilon_s^p} \quad (5a)$$

Siendo,

$$n_f = \lim_{\varepsilon_s^p \rightarrow \infty} n = \frac{1}{b} \quad (5b)$$

$$G = \left(\frac{dn}{d\varepsilon_s^p} \right)_{\varepsilon_s^p \rightarrow 0} = \frac{1}{a} \quad (5c)$$

Reemplazando las ecuaciones (5b) y (5c) en (5a),

$$n = \frac{\varepsilon_s^p}{\frac{1}{G} + \frac{1}{n_f} \varepsilon_s^p} \quad (5d)$$

En base a la ecuación (5d), se obtiene ε_s^p ,

$$\varepsilon_s^p = \frac{n_f n}{G(n_f - n)} \quad (5e)$$

Derivando la ecuación (5d),

$$dn = \frac{G n_f^2}{(n_f + G \varepsilon_s^p)^2} d\varepsilon_s^p \quad (5f)$$

Reemplazando la ecuación (5e) en (5f),

$$dn = G \left(\frac{n_f - n}{n_f} \right)^2 d\varepsilon_s^p \quad (5g)$$

Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995) consideraron que la pendiente inicial G en el plano $n - e_s^p$, es dependiente de p' , de acuerdo a la siguiente formulación,

$$G = G_0 \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\alpha \quad (5h)$$

Reemplazando la ecuación (5h) en (5g), se obtiene la variación de la relación de esfuerzos dn ,

$$dn = G_0 \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\alpha \left(\frac{n_f - n}{n_f} \right)^2 d\varepsilon_s^p \quad (5i)$$

3.2. Modificaciones del modelo base propuesto por Cárdenas J. (2004)

Cárdenas, J. (2004) propuso modificaciones al modelo de Gutiérrez, M., Verdugo R. (1995) con el objetivo de obtener valores de B_0 y G_0 para distintos esfuerzos de confinamiento, debido a que el modelo constitutivo base considera solo un valor de B_0 y G_0 ; consecuentemente poder determinar distintas trayectorias de esfuerzo-deformación por cada esfuerzo de confinamiento. Con ello, robustecer el modelo y poder evaluar distintos fenómenos geotécnicos (p. ej. licuación estática).

3.2.1. Modificación del módulo de deformación volumétrica inicial B_0

Cárdenas, J. (2004) con el objetivo de implementar la dependencia al esfuerzo de confinamiento σ'_c del parámetro B_0 , utilizó la expresión recomendada por Janbu, N. (1963).

$$B_0 = B_s P_a \left(\frac{\sigma'_c}{P_a} \right)^s \quad (6)$$

Siendo:

B_s, s : Parámetros adimensionales del material.

P_a : Presión atmosférica, 101.3 kPa

3.2.2. Modificación del módulo de la pendiente inicial G_0

Cárdenas, J. (2004) de manera similar a lo realizado con B_0 ; implementó la dependencia al confinamiento σ'_c del parámetro G_0 , siguiendo la formulación de Janbu, N. (1963).

$$G_0 = G_r \left(\frac{\sigma'_c}{P_a} \right)^r \quad (7)$$

Siendo:

G_r, r : Parámetros adimensionales del material.

3.2.3. Modificación de la variación de la relación de esfuerzos dn .

Reemplazando la ecuación (7) en (5i),

$$dn = G_r \left(\frac{\sigma'_c}{P_a} \right)^r \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\alpha \left(\frac{n_f - n}{n_f} \right)^2 d\varepsilon_s^p \quad (8)$$

3.2.4. Variación de la presión de poros du

El modelo está orientado a simular el comportamiento no drenado de suelos granulares y los ensayos triaxiales CIU permiten calibrarlo. El material al ser sometido a cargas no drenadas durante un ensayo triaxial desarrolla una deformación volumétrica total nula y es equivalente a $d\varepsilon_v^p$; debido a que las deformaciones elásticas no son consideradas en el modelo, de acuerdo a la asunción (1) del modelo.

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vp}^p + d\varepsilon_{vd}^p = 0 \quad (9)$$

Reemplazando las ecuaciones (2a), (2b), (3a), (6) y (3b) en (9),

$$dp' = -B_s P_a \left(\frac{\sigma_c}{P_a} \right)^s \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\beta \frac{n}{n_f} (n_{cs} - n) d\varepsilon_s^p \quad (10)$$

El principio de esfuerzos efectivos puede expresarse según,

$$du = dp - dp' \quad (11a)$$

Derivando la ecuación (1e),

$$dq = ndp' + p'dn \quad (11b)$$

Considerando $d\sigma_3 = 0$, de (1a y 1b) se tiene,

$$dp = \frac{dq}{3} \quad (11c)$$

Finalmente; reemplazando las ecuaciones (11b) y (11c) en (11a), obtenemos una expresión para la variación de la presión de poros,

$$du = \frac{1}{3}(dp'(n-1) + p'dn) \quad (12)$$

3.3. Optimización del modelo constitutivo propuesto en la presente tesis

La presente tesis busca también optimizar el modelo constitutivo inicialmente propuesto por Gutiérrez, M., Verdugo R., (1995) y luego modificado por Cárdenas, J. (2004), con el objetivo de dar una mejor interpretabilidad al modelo constitutivo y simplificarlo en cantidad de términos y parámetros, asimismo, darle mayor versatilidad y finalmente optimizarlo para poder capturar mejor la evolución de p' , q y u a lo largo que el material se va deformando, para distintos confinamientos evaluados.

Asimismo, el modelo constitutivo optimizado permite obtener rangos típicos de los parámetros del modelo para evaluar comportamientos contractivos frágiles en condiciones no drenadas en materiales de relave; esto con el objetivo de facilitar la calibración del modelo para futuras investigaciones.

Para ello, en la presente tesis, se realizó lo siguiente:

- Se modificó la formulación G unificando sus exponentes y constantes, actualizando la formulación para dn ; el acápite 3.3.1 se da un mayor detalle.
- Asimismo; se modificó la formulación de B , unificando sus exponentes y constantes, actualizando la formulación para dp' ; ver acápite 3.3.2.
- Optimización y mejora del modelo constitutivo por medio de una actualización de la formulación de dp' , para capturar la correcta evolución de p' , q y u , a medida que el material se va deformando para los distintos confinamientos evaluados. Para ello, se agregó en la formulación de dn un término exponencial no lineal de signo negativo en base a $(n_{cs} - n)$ y $d\varepsilon_s^p$; el acápite 3.3.2 lo detalla.
- La formulación de du se actualizó debido a la actualización de la formulación de dn y de dp' ; ver acápite 3.3.3.
- Inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última en el modelo, para ello se impuso formulaciones nuevas en el modelo constitutivo optimizado; el acápite 3.3.4 da un mayor detalle.

3.3.1. Actualización de la variación de la relación de esfuerzos dn

Se modificó el parámetro G ; unificando los exponentes del σ'_c y las constantes G_r y P_a , asimismo, manteniendo el exponente de p' . Con el objetivo de simplificar y reducir los términos en la fórmula.

En base en las ecuaciones (5h) y (7), la expresión para G era,

$$G = G_r \left(\frac{\sigma'_c}{P_a} \right)^r \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\alpha \quad (13a)$$

Luego, G es actualizado en la presente tesis, siguiendo la formulación,

$$G = G_u \frac{(\sigma'_c)^{u_2}}{(p')^\alpha} \quad (13b)$$

Siendo:

G_u, u_2 : Parámetros adimensionales del material.

Con la actualización de G , consecuentemente se actualizó la formulación de dn . Reemplazando la ecuación (13b) en (8); dn actualizado viene dado por,

$$dn = G_u \frac{(\sigma'_c)^{u_2}}{(p')^\alpha} \left(\frac{n_f - n}{n_f} \right)^2 d\varepsilon_s^p \quad (13c)$$

3.3.2. Optimización de la variación del esfuerzo efectivo medio dp'

De manera similar a la actualización realizada a G , se realizó para el módulo de deformación volumétrica B , unificando los exponentes del σ'_c y las constantes B_s y P_a , asimismo, manteniendo el exponente de p' .

En base en las ecuaciones (2b) y (6), la expresión para B era,

$$B = B_s P_a \left(\frac{\sigma'_c}{P_a} \right)^s \left(\frac{\sigma'_c}{p'} \right)^\beta \quad (14a)$$

Luego, B es actualizado en la presente tesis, siguiendo la formulación,

$$B = B_u \frac{(\sigma'_c)^{u_1}}{(p')^\beta} \quad (14b)$$

Siendo:

B_u, u_1 : Parámetros adimensionales del material.

Con la actualización de B , consecuentemente se actualizó la formulación de dp' . Reemplazando la ecuación (14b) en (10); dn actualizado viene dado por,

$$dp' = -B_u \frac{(\sigma'_c)^{u_1}}{(p')^\beta} \frac{n}{n_f} (n_{cs} - n) d\varepsilon_s^p \quad (14c)$$

Una parte muy relevante de la presente tesis es la optimización de la formulación de dp' para los distintos materiales de relave evaluados, la cual busca principalmente lo siguiente:

- La correcta evolución de p' , q y u , a medida que el material se va deformando, para valores de deformación axial, ε_1 , de 0.00 a 0.25.

- Capturar adecuadamente la trayectoria de esfuerzos y deformaciones en los planos $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ para cada uno de los esfuerzos de confinamiento evaluados.
- Obtener rangos típicos de valores de los parámetros del modelo optimizado que capturan y calibran adecuadamente el mismo para evaluar comportamientos contractivos frágiles en condiciones no drenadas.

El comportamiento contractivo frágil en condiciones no drenadas son materia de estudio en la presente tesis, al ser el comportamiento susceptible a presentar el fenómeno licuación estática bajo condiciones de esfuerzos dados.

Para la materialización de tal objetivo de optimización; se evaluó varias modificaciones a la formulación de dp' teniendo como punto de partida la formulación de Cárdenas, J. (2004). Finalmente; se consiguió optimizar dp' , teniendo éxito al agregar a su formulación un término exponencial no lineal de signo negativo que tiene en su formulación la distancia entre la relación de esfuerzos y la relación de esfuerzos en estado crítico ($n_{cs} - n$), asimismo, tiene el incremento exponencial de la deformación de corte plástico $d\varepsilon_s^p$.

El término agregado en la presente tesis a la formulación de dp' , es,

$$-C_p(n_{cs} - n)^{x_1}(d\varepsilon_s^p)^{x_2} \quad (14d)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} C_p & : \quad \text{Parámetro en unidad de presión (kPa) del material.} \\ x_1, x_2 & : \quad \text{Parámetros adimensionales del material.} \end{aligned}$$

Este nuevo término, permite capturar la correcta evolución de p' a medida que el material experimenta deformación de corte.

Agregando la ecuación (14d) en (14c), se obtiene la variación del esfuerzo efectivo medio dp' optimizado en la presente tesis,

$$dp' = -B_u \frac{(\sigma'_c)^{u_1}}{(p')^{\beta}} \frac{n}{n_f} (n_{cs} - n) d\varepsilon_s^p - C_p(n_{cs} - n)^{x_1}(d\varepsilon_s^p)^{x_2} \quad (14e)$$

3.3.3. Actualización de la variación de la presión de poros du

La formulación de du se actualizó debido a la actualización de la fórmula de dn (ecuación 13c) y fórmula optimizada de dp' (ecuación 14e).

Por otro lado, luego de la revisión y análisis de las formulaciones del modelo modificado por Cárdenas, J. (2004); se identificó que el término $(n - 1)$ de la ecuación (12) no es correcta y debe ser $(n - 3)$. En consecuencia, la formulación du se corrigió en la presente tesis, definida por,

$$du = \frac{1}{3}(dp'(n - 3) + p'dn) \quad (15)$$

3.3.4. Inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última

El modelo constitutivo base realizado por Gutiérrez, M., Verdugo R., (1995) y modificado por Cárdenas, J. (2004) considera conceptualmente el estado crítico del material por medio de n_{cs} y p'_{cs} ; sin embargo, los parámetros en estado crítico p'_{cs} , q_{cs} , n_{cs} y u_{cs} como condición última de esfuerzos, no están incluidas completamente en la formulación del modelo.

Cuando un material llega al estado crítico, el mismo se deforma continuamente bajo un esfuerzo cortante y efectivo medio constante y a volumen y velocidad constante.

De acuerdo a lo mencionado, en la presente tesis, se impuso las formulaciones 16a y 16b en el modelo constitutivo optimizado, para incluir los esfuerzos en estado crítico como condición última del modelo.

En condiciones no drenadas, la relación de esfuerzos n va aumentando y el esfuerzo efectivo medio p' va disminuyendo a medida que el material se va deformando por corte (incremento de ε_s^p). Para la presente tesis, el comportamiento no drenado que desencadena en una respuesta contractiva frágil es materia de investigación, por ser el comportamiento susceptible a desarrollar el fenómeno de licuación estática.

Una vez que un material llega al estado crítico, el esfuerzo efectivo medio p' , la relación de esfuerzos n y las variaciones dn , dp' , du se mantienen constantes mientras el material se va deformando $d\varepsilon_s^p > 0$.

En virtud a lo descrito y para asegurar que el estado último del modelo sea el estado crítico, se incluyó de manera explícita, las siguientes dos (2) condiciones,

- La primera condición; limita la reducción del p' , el cual inicia en σ'_c y va disminuyendo continuamente hasta llegar el estado crítico p'_{cs} siguiendo la ecuación (14e); una vez llegado al estado crítico n , p' y u son constantes, es decir, sus variaciones respectivas son nulas. Es importante mencionar que en la ecuación (16a) no es necesario agregar $dq = 0$, debido a que, q , sería constante en el estado crítico de acuerdo a la ecuación (1e).

$$p' \leq p'_{cs} \rightarrow p' = p'_{cs}; dn = dp' = du = 0 \quad (16a)$$

- La segunda condición; limita el aumento de n , el cual inicia en "0" y va aumentando continuamente hasta llegar el estado crítico n_{cs} siguiendo la ecuación (13c), una vez llegado al estado crítico n es constante e igual a n_{cs} .

$$n \geq n_{cs} \rightarrow n = n_{cs} \quad (16b)$$

3.4. Procedimiento del cálculo general

El procedimiento del cálculo general de modelo constitutivo optimizado es realizado de manera explícita, siguiendo una secuencia incremental iterativa.

3.4.1. Formulaciones principales del modelo

Para que el modelo constitutivo optimizado pueda describir el comportamiento de un material en el campo de esfuerzos y deformaciones, las ecuaciones principales son (4a), (13c), (14e), (1e) y (15); las cuales determinan los valores de la relación de esfuerzos en la resistencia máxima n_f , relación de esfuerzos y su variación dn , n , esfuerzo efectivo medio y su variación dp' , p' , esfuerzo desviador q , la presión

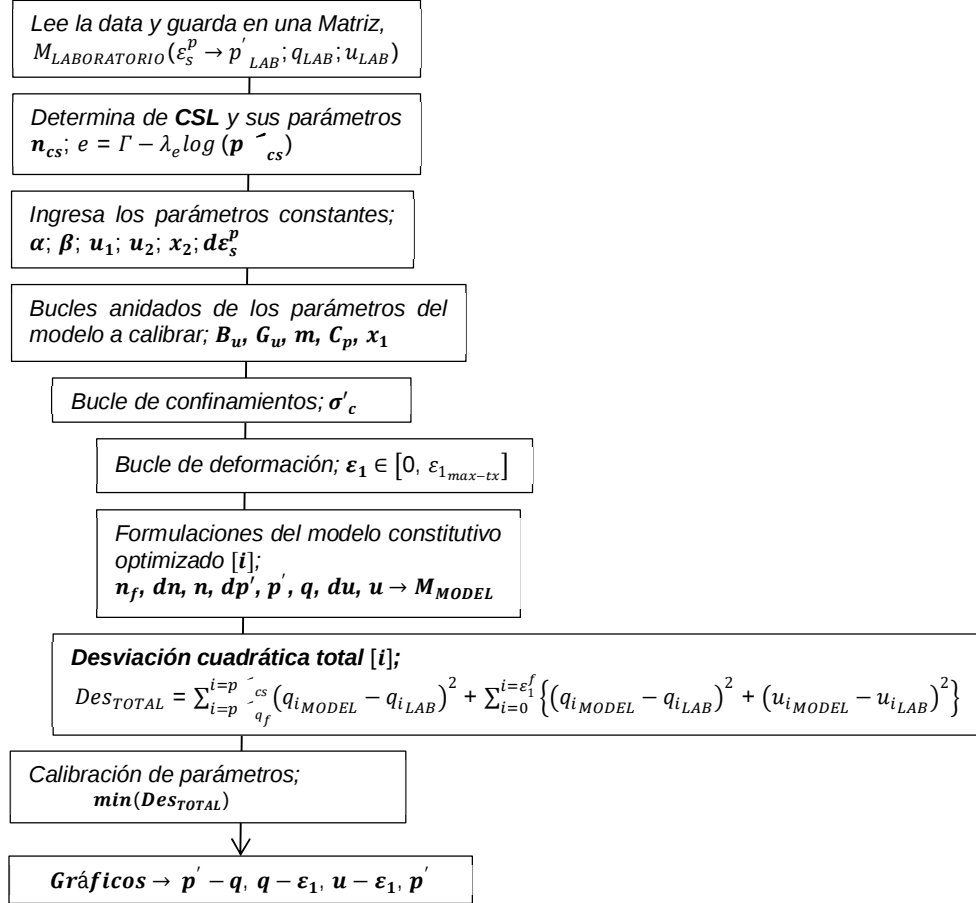
de poros y su variación du , u ; en ese orden continuamente mientras el material se va deformando $d\varepsilon_s^p$.

Así también; son las formulaciones de la inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última, las cuales vienen dadas por las ecuaciones (16a) y (16b).

Las formulaciones principales se utilizarán para la implementación numérica del modelo constitutivo optimizado, la cual se describe en el acápite 3.4.3.

3.4.2. Diagrama de flujo del modelo

El diagrama de flujo del procedimiento que se sigue para la utilización del modelo constitutivo optimizado en líneas generales se muestra a continuación,



3.4.3. Implementación numérica del modelo constitutivo

La implementación numérica del modelo constitutivo optimizado sigue el método de Newton-Raphson, basado en el desarrollo de Taylor; el cual sigue una secuencia iterativa de diferenciales para determinar los parámetros claves del modelo que describen el comportamiento del material, por medio de las formulaciones principales descritas en el acápite 3.4.1 y la secuencia detallada en el diagrama de flujo (ver acápite 3.4.2).

De manera general, la secuencia numérica iterativa de diferenciales viene dada de la siguiente manera,

$$x_{i+1} = x_i + dx_i \quad (17)$$

Las formulaciones principales a utilizar para la modelación numérica del modelo constitutivo, descritos en el acápite 3.4.1; son,

$$n_f = n_{cs} \left(\frac{p'}{p'_{cs}} \right)^m \quad (18a)$$

$$dn = G_u \frac{(\sigma'_c)^{u_2}}{(p')^\alpha} \left(\frac{n_f - n}{n_f} \right)^2 d\varepsilon_s^p \quad (18b)$$

$$n_{i+1} = n_i + dn_i; i \in [1, i_{final}] \quad (18c)$$

$$dp' = -B_u \frac{(\sigma'_c)^{u_1}}{(p')^\beta} \frac{n}{n_f} (n_{cs} - n) d\varepsilon_s^p - C_p (n_{cs} - n)^{x_1} (d\varepsilon_s^p)^{x_2} \quad (18d)$$

$$p'_{i+1} = p'_i + dp'_i; i \in [1, i_{final}] \quad (18e)$$

$$q_i = n_i p'_i; i \in [1, i_{final}] \quad (18f)$$

$$du = \frac{1}{3} (dp' (n - 3) + p' dn) \quad (18g)$$

$$u_{i+1} = u_i + du_i; i \in [1, i_{final}] \quad (18h)$$

Asimismo, se utilizan las ecuaciones de la inclusión numérica de los esfuerzos en el estado crítico como condición última en el modelo constitutivo,

$$p' \leq p'_{CS} \rightarrow p' = p'_{CS}; dn = dp' = du = 0 \quad (19a)$$

$$n \geq n_{CS} \rightarrow n = n_{CS} \quad (19b)$$

3.4.4. Algoritmo del modelo constitutivo optimizado

En base al diagrama de flujo (ver acápite 3.4.2), se desarrolló un algoritmo del modelo constitutivo; el cual se usó como base para la creación del código en lenguaje de programación Python. El algoritmo se presenta a continuación,

```

1:      Creación de libro en Excel de los ensayos triaxiales
2:      Datos Ms. Excel  $\rightarrow M_{LAB}(\varepsilon_s^p \rightarrow p'_{LAB}; q_{LAB}; u_{LAB})$ 
3:       $CSL_{LAB} \rightarrow n_{CS}; \lambda_e; \Gamma; e = \Gamma - \lambda_e \log(p')$ 
4:      Gráficos  $\rightarrow p' - q; p' - e \wedge CSL$ 
5:      Definición  $\rightarrow \alpha = \beta = 0.20; u_1 = 1.40; u_2 = 0.65; x_2 = 1.00; P_a = 101.3$ 
6:      Definición  $\rightarrow d\varepsilon_s^p = 0.0010$ 
7:      for  $B_u$  in range( $B_{u_{max}}$ ):
8:          for  $G_u$  in range( $G_{u_{max}}$ ):
9:              for  $m$  in range( $m_{max}$ ):
10:                  for  $C_p$  in range( $C_{p_{max}}$ ):
11:                      for  $x_1$  in range( $x_{1_{max}}$ ):
12:                           $n_{iteración} = n_{iteración} + 1$ 
13:                          for  $d\varepsilon_s^p$  in range( $d\varepsilon_{s_{maxLAB}}^p$ ):
14:                               $M_{MODEL} \rightarrow n_{f_{i_{MODEL}}}; dn_{i_{MODEL}}$ 
15:                               $M_{MODEL} \rightarrow n_{i_{MODEL}}; dp'_{i_{MODEL}}$ 
16:                               $M_{MODEL} \rightarrow p'_{i_{MODEL}}; q_{i_{MODEL}}$ 
17:                               $M_{MODEL} \rightarrow du_{i_{MODEL}}; u_{i_{MODEL}}$ 
18:                               $des_{i_{p'-q}} = (q_{i_{MODEL}} - q_{i_{LAB}})^2$ 
19:                               $des_{i_{q-e}} = (q_{i_{MODEL}} - q_{i_{LAB}})^2$ 
20:                               $des_{i_{u-e}} = (u_{i_{MODEL}} - u_{i_{LAB}})^2$ 
21:                               $des_{TOTAL_i} = des_{i_{p'-q}} + des_{i_{q-e}} + des_{i_{u-e}}$ 
22:                           $\min(des_{TOTAL_i}) \rightarrow \text{set calibrado } (B_u, G_u, m, C_p, x_1)$ 
23:                          Gráficos  $\rightarrow p' - q, \varepsilon_1 - q, \varepsilon_1 - u, \varepsilon_1 - p'$ 
24:                          Fin

```

Capítulo IV: Calibración y validación del modelo optimizado

En el presente capítulo, se describe la secuencia de calibraciones del modelo constitutivo optimizado propuesto para materiales granulares (p.ej., relave) que desarrollan comportamiento contractivo frágil en condiciones no drenadas y que son susceptibles a presentar el fenómeno de licuación estática; materia de investigación en la presente tesis.

4.1. Parámetros independientes del modelo

En este acápite se describe los parámetros independientes del modelo y el rango típico de valores de cada uno.

4.1.1. Parámetros Independientes

Los parámetros independientes del modelo constitutivo optimizado son input o valores de entrada necesarios para el funcionamiento del modelo constitutivo siguiendo las formulaciones descritas en el acápite 3.4.3 y tener la capacidad de modelación de la licuación estática.

Los parámetros independientes del modelo constitutivo optimizado son los siguientes,

- B_u : Representada en la ecuación (14b) del acápite 3.3.2.
- G_u : Representada en la ecuación (13b) del acápite 3.3.1.
- m : Representada en la ecuación (4a) del acápite 3.1.3.
- C_p : Representada en la ecuación (14d) del acápite 3.3.2.
- x_1 : Representada en la ecuación (14d) del acápite 3.3.2.
- u_1 : Representada en la ecuación (14b) del acápite 3.3.2.
- u_2 : Representada en la ecuación (13b) del acápite 3.3.2.
- α : Representada en la ecuación (5h) del acápite 3.3.2.
- β : Representada en la ecuación (2b) del acápite 3.1.2.
- x_2 : Representada en la ecuación (14d) del acápite 3.3.2.

4.1.2. Definición de rangos típicos de los parámetros independientes

La definición de los rangos típicos de los parámetros independientes del modelo constitutivo optimizado se desarrolla en base a calibraciones iniciales realizadas en varios materiales bajo condiciones no drenadas y con comportamiento contractivo, por medio del uso del software Microsoft Excel.

De acuerdo a lo descrito y desarrollado, se evidenció lo siguiente:

- Los parámetros α, β, x_2 no son sensibles a un mejor o peor desempeño del modelo constitutivo optimizado al modelar comportamientos contractivos de materiales, por ello, en la presente tesis se consideran constantes dentro de la formulación del modelo. Determinando, $\alpha = 0.20$; $\beta = 0.20$ y $x_2 = 1.00$.
- Los parámetros adimensionales u_1, u_2 representadas en las ecuaciones (14b) y (13b), no son sensibles a una mejor calibración del modelo constitutivo para modelar el comportamiento contractivo frágil de un relave, por ello, se consideraron constantes en la modelación del modelo constitutivo optimizado. Se determinó, $u_1 = 1.40$ y $u_2 = 0.65$.

Para la definición del rango de valores típicos de cada parámetro independiente se evaluó un rango más amplio del obtenido en las calibraciones iniciales, menor a la izquierda del valor mínimo y mayor a la derecha del valor máximo de cada uno de ellos; obteniéndose un rango más amplio. El objetivo de esta evaluación es asegurar que cada parámetro independiente este incluido dentro de su rango típico de valores, mayor detalle se presenta en el acápite 4.4.

Los rangos típicos de los parámetros independientes a calibrar; son los siguientes,

- B_u puede tener un valor mínimo de 1.50 y un valor máximo de 15.50.
- G_u puede tener un valor mínimo de 0.10 y un valor máximo de 25.00.
- m puede tener un valor mínimo de 0.00100 y un valor máximo de 0.13250.
- C_p puede tener un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 15000.
- x_1 puede tener un valor mínimo de 0.95 y un valor máximo de 1.15.

4.2. Materiales de relave a modelar

En este acápite se describe la información de caracterización geotécnica relevante para la modelización de la respuesta no drenada de los materiales de relave.

4.2.1. Información general de las muestras de relave

Los materiales analizados en la presente tesis son relaves arenosos pertenecientes a depósitos de relaves ubicados en zonas mineras de Perú.

Para la investigación se consideró cuatro (4) materiales de relave a ser evaluados; la Tabla 4-1 muestra un resumen de las muestras de materiales de relave.

Tabla 4-1: Información general de las muestras de relave

Código de Muestra ¹	Muestra	Ubicación	Mineralogía
Te-AR-2024-M1	Relave cicloneado grueso ²	Perú	—
Te-AR-2024-M2	Relave convencional ³	Perú	Cobre principalmente; molibdeno y plata.
Te-AR-2024-M3	Relave Convencional ³	Perú	Cobre y zinc principalmente; molibdeno, plata y plomo.
Te-AR-2024-M4	Relave convencional ³	Perú	Cobre principalmente; molibdeno y plata.

Nota:

1. El código de la muestra fue propuesto por el autor de la tesis.
2. Relave obtenido del cicloneo de relaves, material grueso ubicado en la parte inferior de los ciclones; también llamado arena de relave o relave underflow (u/f).
3. Relave obtenido de un proceso de flotación y conducido al embalse del depósito de relaves, también llamado relave en pulpa.

4.2.2. Propiedades geotécnicas estándar de los materiales de relave

La Tabla 4-2 muestra las propiedades físicas y geotécnicas de los materiales de relave que son analizados y evaluados en la presente investigación.

Tabla 4-2: Propiedades geotécnicas estándar de los relaves

Código	Muestra	Clasificación SUCS	Propiedades estándar (Granulometría y Límites de Atterberg)	Gravedad específica de sólidos (Gs)
Te-AR-2024-M1	Relave cicloneado grueso	SP – Arena pobremente gradada	Grava: 0.0 %, arena: 98.1 %, finos: 1.9 %; y LL: NP, LP: NP, IP: NP	2.96
Te-AR-2024-M2	Relave convencional	ML – Limo de baja plasticidad arenos	Grava 0.0 %, arena 42.0 %, finos 58.0 %; y LL: NP, LP: NP, LL:NP	3.29

Te-AR-2024-M3	Relave convencional	ML – Limo de baja plasticidad arenoso	Grava 0.0 %, arena 47.0 %, finos 53.0 %; y LL: NP, LP: NP, IP: NP	3.20
Te-AR-2024-M4	Relave convencional	ML – Limo de baja plasticidad arenoso	Grava 0.0 %, arena 43.0 %, finos 57.0 %; y LL: NP, LP: NP, IP: NP	2.68

4.2.3. Ensayos triaxiales drenados y no drenados ensayados en los relaves

La Tabla 4-3 muestra las propiedades geotécnicas importantes de los relaves testeados por medio de ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente drenados CID y no drenados CIU; los cuales son datos iniciales para el modelo constitutivo.

Tabla 4-3: Propiedades geotécnicas de los relaves obtenidos de ensayos triaxiales CID y CIU¹

Código	Triaxial	σ'_c (kPa)	Humedad ² (%)	Densidad seca ² (g/cm ³)	Saturación ³ (%)	Parámetro B ⁴
Te-AR-2024-M1	CID	400	5	1.34	–	0.96
	CIU	200	5	1.34	–	0.95
	CIU	300	5	1.34	–	0.95
	CIU	400	5	1.34	–	0.96
Te-AR-2024-M2	CID	200	10	1.70	99.5	0.98
	CID	400	10	1.90	99.5	0.98
	CID	1 200	10	2.10	99.2	0.98
	CIU	200	10	1.70	99.8	0.98
	CIU	400	10	1.90	100	0.98
	CIU	1 200	10	2.10	99.7	0.98
Te-AR-2024-M3	CID	600	10	1.81	99.6	0.99
	CID	900	10	2.21	99.7	0.99
	CIU	300	10	1.60	99.3	0.99
	CIU	600	10	1.81	99.6	1.00
Te-AR-2024-M4	CID	400	10	1.55	99.9	0.98
	CID	600	10	1.70	99.1	0.97
	CID	1 200	10	1.65	99.5	0.98
	CIU	200	10	1.55	99.9	0.98
	CIU	400	10	1.55	99.4	0.98
	CIU	1 200	10	1.65	99.6	0.98

Notas:

1. El tipo de compactación utilizada para los ensayos que llegan al estado crítico fue moist tamping.
2. Medido durante la preparación de la muestra.
3. Medido luego de la etapa de consolidación, es decir, antes de la etapa de corte.
4. Parámetro B de Skempton medido en la etapa de saturación, si $B \geq 0.95$ el material se considera saturado.

4.3. Determinación de parámetros en el estado crítico

4.3.1. Valores geotécnicos importantes en estado crítico basados en ensayos triaxiales en los materiales de relave

Los valores geotécnicos relevantes obtenidos de ensayos triaxiales CID y CIU son necesarios para evaluar el estado crítico de los relaves.

Se caracteriza los relaves en base a la teoría del estado crítico con fines de calibración del modelo constitutivo optimizado. Con ello, se obtienen parámetros y formulaciones que describan el comportamiento del material en este estado; como son la relación de vacíos e_{cs} y esfuerzo efectivo medio p'_{cs} en el estado crítico, para cada uno de los esfuerzos de confinamiento σ'_c ensayados. Estos parámetros son input necesario para el modelo constitutivo estudiado.

La Tabla 4-4 resume los valores geotécnicos relevantes obtenidos de ensayos triaxiales CID y CIU realizados en muestras de relaves; en su estado inicial, en la etapa de consolidación y en el estado crítico.

Tabla 4-4: Propiedades de los relaves en el estado crítico basados en ensayos triaxiales CID y CIU

Código	Triaxial	Estado Inicial		Etapa Consolidación		Estado Crítico	
		σ'_c	e_i	e_c^{1}	$p'_{cs}{}^2$	e_{cs}	
		(kPa)			(kPa)		
Te-AR-2024-M1	CID	400	1.020	0.819	811.0	0.673	
	CIU	200	0.960	0.843	31.4	0.843	
	CIU	300	0.940	0.794	63.5	0.794	
	CIU	400	0.930	0.762	126.9	0.762	
Te-AR-2024-M2	CID	211	0.942	0.507	420.5	0.415	
	CID	404	0.738	0.474	769.9	0.392	
	CID	1 211	0.572	0.403	2 306.4	0.334	
	CIU	203	0.942	0.521	6.0	0.521	
	CIU	406	0.739	0.469	49.1	0.469	
	CIU	1 204	0.573	0.398	608.7	0.398	
Te-AR-2024-M3	CID	590	0.767	0.541	1 153.0	0.447	
	CID	905	0.530	0.469	1 768.8	0.430	
	CIU	303	0.998	0.572	23.2	0.572	
	CIU	605	0.767	0.526	71.9	0.526	
Te-AR-2024-M4	CID	412	0.735	0.592	795.5	0.498	
	CID	611	0.610	0.530	1 161.6	0.460	

CID	1 217	0.626	0.506	2 287.6	0.413
CIU	198	0.845	0.628	14.9	0.628
CIU	405	0.737	0.582	55.8	0.582
CIU	1 204	0.627	0.501	549.5	0.501

Nota:

1. Medido luego de la etapa de consolidación, es decir, antes de la etapa de corte.
2. Los valores fueron redondeados a un decimal.

Los ensayos triaxiales CIU y CID de los materiales de relave descritos, se eligieron considerando que presenten las siguientes características:

- Los ensayos llegan al estado crítico,
- El material de relave presenta un comportamiento contractivo frágil para su condición no drenada, es decir, es susceptible a desarrollar el fenómeno de licuación estática, y
- Tener esfuerzos de confinamiento menores a 1.25 MPa para evitar rotura de partículas y esto pueda distorsionar la determinación del estado crítico de los relaves.

4.3.2. Estado crítico de los materiales de relave

En base a los ensayos triaxiales descritos y sus valores importantes en el estado crítico, se determinó el lugar geométrico de estado crítico en el campo $p' - q$ y $p' - e$ de cada relave; obteniendo parámetros característicos de estado crítico, como la relación de esfuerzos n_{cs} (M_{tc} , llamado por (Jefferies, M., & Been, K., 2015)) y formulación de la superficie bidimensional $p' - e$.

La Tabla 4-5 muestra el resumen de los parámetros importantes y formulación que describe la superficie bidimensional $p' - e$ en el estado crítico, de los relaves analizados.

Tabla 4-5: Parámetros y superficie que describen el comportamiento de los relaves en el estado crítico

Código	Muestra	Estado crítico			
		$p' - q$		$p' - e$	
		n_{cs}^1	Γ	λ_e	e_{cs}
Te-AR-2024-M1	Relave				
	cicloneado grueso	1.53	1.011	0.051	$1.011 - 0.051 \ln(p'_{cs})$

Te-AR-2024-M2	Relave convencional	1.44	0.582	0.030	$0.582 - 0.030 \ln(p'_{cs})$
Te-AR-2024-M3	Relave convencional	1.47	0.667	0.032	$0.667 - 0.032 \ln(p'_{cs})$
Te-AR-2024-M4	Relave convencional	1.43	0.742	0.040	$0.742 - 0.040 \ln(p'_{cs})$

Nota:

1. Los valores fueron redondeados a dos decimales.

A continuación, en la Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3 y Figura 4-4 se presentan las superficies bidimensionales en estado crítico $p' - q$ y $p' - e$ con líneas grises discontinuas, para cada uno de los relaves evaluados.

▪ Muestra Te-AR-2024-M1 – Relave cicloneado grueso

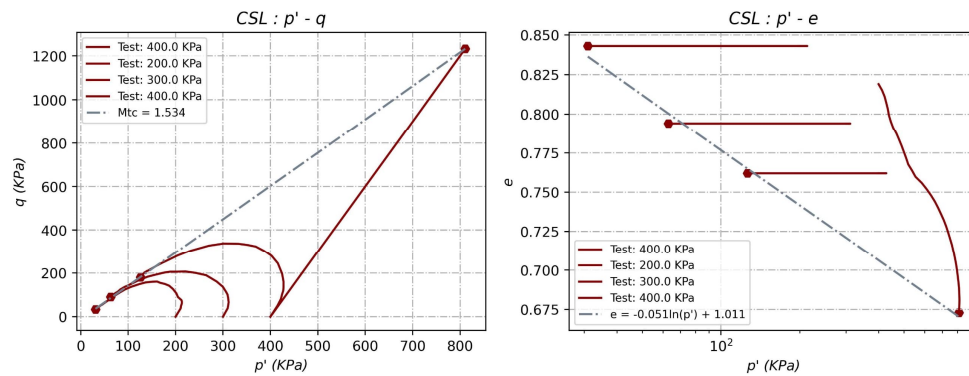


Figura 4-1: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M1

▪ Muestra Te-AR-2024-M2 – Relave convencional

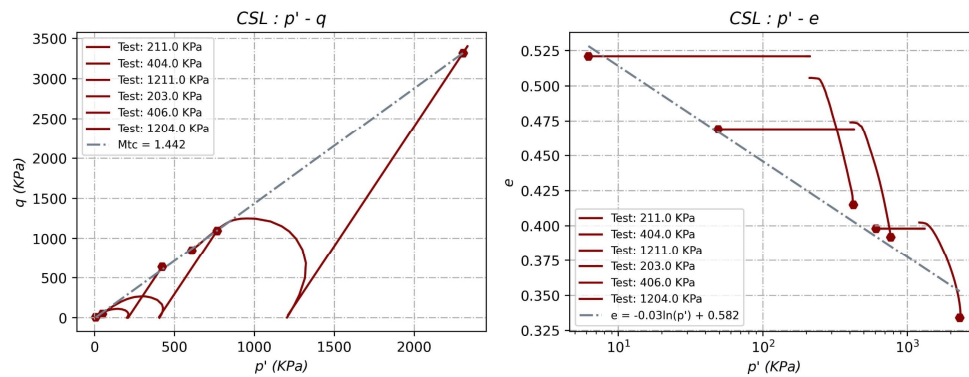


Figura 4-2: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M2

■ Muestra Te-AR-2024-M3 – Relave convencional

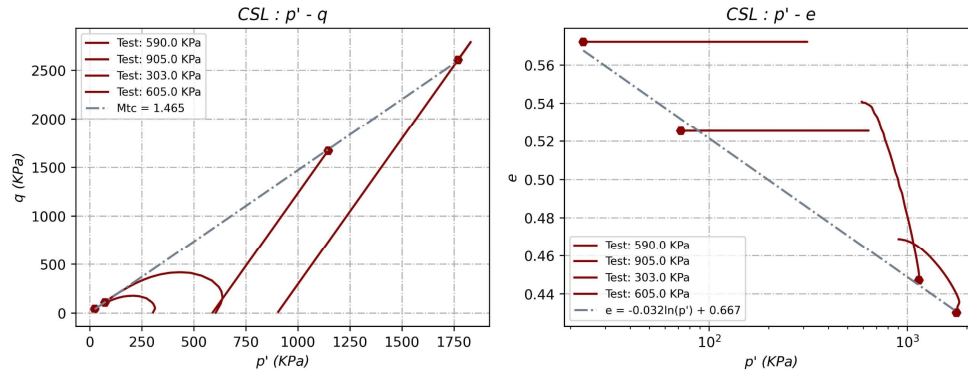


Figura 4-3: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M3

■ Muestra Te-AR-2024-M4 – Relave convencional

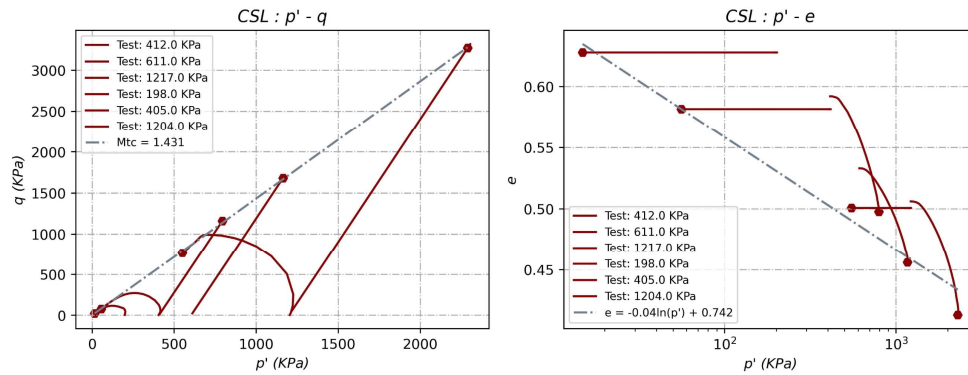


Figura 4-4: Superficie de estado crítico $p' - q$, $p' - e$ de la muestra de relave Te-AR-2024-M4

4.4. Calibración del modelo constitutivo para los relaves evaluados

La calibración del modelo constitutivo optimizado para los materiales de relave descritos se realizó por medio de la creación de un código en lenguaje de programación Python, siguiendo el diagrama de flujo, formulaciones de la implementación numérica y algoritmo del modelo, detallado en el capítulo III.

4.4.1. Determinación de parámetros que calibran el modelo constitutivo

Para la determinación de los parámetros que calibran el modelo constitutivo, se creó un código en lenguaje de programación Python para la presente Tesis, buscando optimizar el tiempo de calibración y abarcar todos los posibles sets de

parámetros; para finalmente obtener el set de parámetros que mejor calibra el modelo.

El código creado tiene las siguientes características y consideraciones:

- Itera a gran escala los posibles valores de cada parámetro independiente dentro de su rango típico definido y obtiene el set de parámetros que calibra mejor el modelo constitutivo optimizado.
- El set de parámetros que calibra el modelo se definió como el que tiene la menor sumatoria de desviación cuadrática total entre los valores del ensayo triaxial CIU y los calculados por el modelo constitutivo optimizado, para los campos $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$ y $\varepsilon_1 - u$, a lo largo de la deformación.
- La sumatoria de desviación en el campo $p' - q$ se consideró los valores desde el p'_{qf} hasta el p'_{cs} , debido a que los ensayos triaxiales CIU dilatan desde el inicio $p' = \sigma'_c$ hasta el p'_{qf} . Sin embargo, el modelo constitutivo estudiado, así como otros que evalúan comportamientos contractivos, no tienen la capacidad de dilatar desde el inicio para condiciones no drenadas; esto puede deberse a un reajuste de partículas a bajas deformaciones en la ejecución de los ensayos triaxiales CIU.

$$Des_{TOTAL} = \sum_{i=p'_{qf}}^{i=p'_{cs}} (q_{i_{MODEL}} - q_{i_{LAB}})^2 + \sum_{i=0}^{i=\varepsilon_1^f} \{ (q_{i_{MODEL}} - q_{i_{LAB}})^2 + (u_{i_{MODEL}} - u_{i_{LAB}})^2 \} \quad (20)$$

- Plotea la secuencia de valores calculados en los campos $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ con el set de parámetros calibrado del modelo constitutivo optimizado, asimismo, los valores de los ensayos triaxiales no drenados.

Asimismo, para la calibración se utilizó un step o paso para cada rango típico definido de los parámetros independientes a calibrar, iterando el modelo constitutivo para cada set de parámetros posibles, siendo un total de ciento veinte mil (120 000) veces; para finalmente obtener el set de parámetros calibrado para cada material de relave evaluado.

La Tabla 4-6 muestra los steps, valor inicial, valor final y numero de iteraciones de cada set de parámetros evaluados que el código en Python considerados para calibrar el modelo constitutivo para cada uno de los relaves analizados.

Tabla 4-6: Steps, rangos típicos y número de iteraciones de los parámetros independientes calibrados

Parámetro	B_u	G_u	m	C_p	x_1
Valor inicial	1.50	0.10	0.0010	0.00	0.950
Valor final	15.50	25.0	0.13250	15 000	1.150
Step	1.400	2.490	0.013150	500.0	0.050
Cantidad de opciones por parámetro	10	10	10	30	4
Número de iteraciones	120 000				

4.4.2. Set de parámetros calibrados del modelo constitutivo

La Tabla 4-7 muestra los parámetros calibrados del modelo constitutivo optimizado.

Tabla 4-7: Parámetros calibrados del modelo para cada uno de los relaves evaluados

Código	B_u	G_u	m	C_p	x_1	u_1^1	u_2^1	α^1	β^1	x_2^1
Te-AR-2024-M1	8.5	10.06	0.05360	1500	1.05					
Te-AR-2024-M2	2.9	7.57	0.04045	7000	0.95					
Te-AR-2024-M3	14.1	10.06	0.06675	5000	1.10	1.40	0.65	0.20	0.20	1.00
Te-AR-2024-M4	7.1	7.57	0.1062	6500	0.95					

Nota:

1. Para el modelo constitutivo optimizado es un parámetro constante.

4.4.3. Salidas del modelo constitutivo calibrado

La Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7 y Figura 4-8 presentan las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ para cada uno de los relaves evaluados, mostrando lo simulado por el modelo constitutivo optimizado (líneas negras discontinuas) y los valores obtenidos en los ensayos triaxiales CIU (líneas guindas continuas).

Asimismo, las figuras muestran el desempeño del modelo constitutivo para modelar la respuesta frágil no drenada de los materiales de relave estudiados en la presente tesis, para esfuerzos de confinamiento de 198 a 1 217 kPa y densidades de 1.34 a 2.21 g/cm³, además, captura adecuadamente las respuestas de los relaves en los espacios esfuerzo-deformación y trayectoria de esfuerzos.

■ Muestra Te-AR-2024-M1 – Relave cicloneado grueso

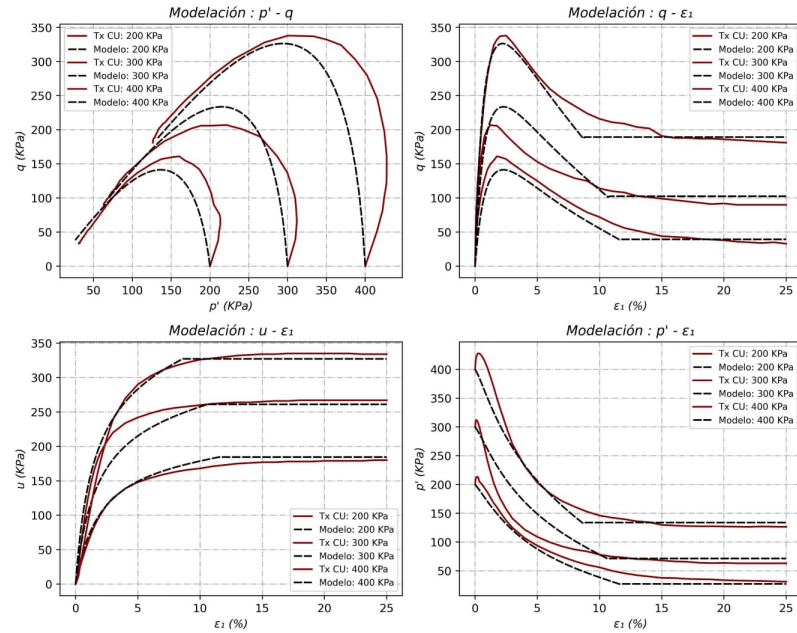


Figura 4-5: Trayectorias $p' - q$, $\epsilon_1 - q$, $\epsilon_1 - u$ y $\epsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M1

■ Muestra Te-AR-2024-M2 – Relave convencional

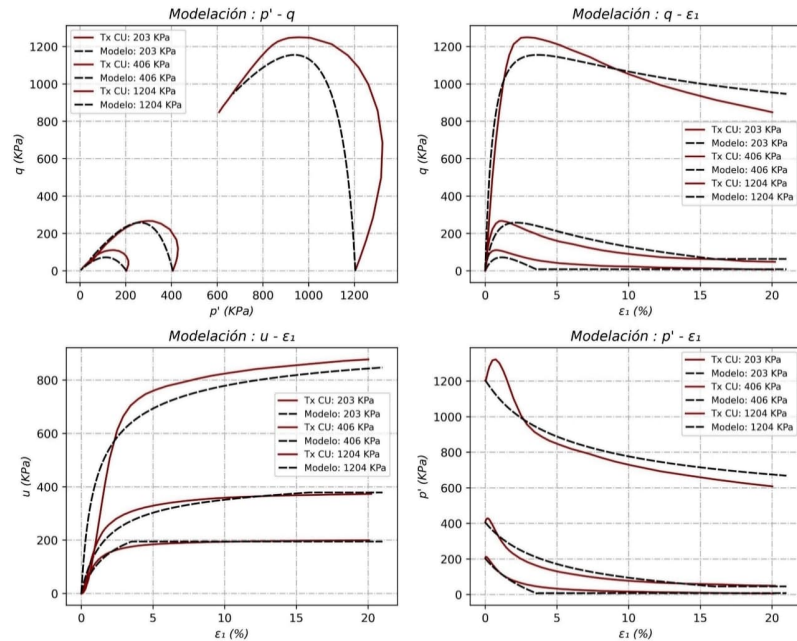


Figura 4-6: Trayectorias $p' - q$, $\epsilon_1 - q$, $\epsilon_1 - u$ y $\epsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M2

■ Muestra Te-AR-2024-M3 – Relave convencional

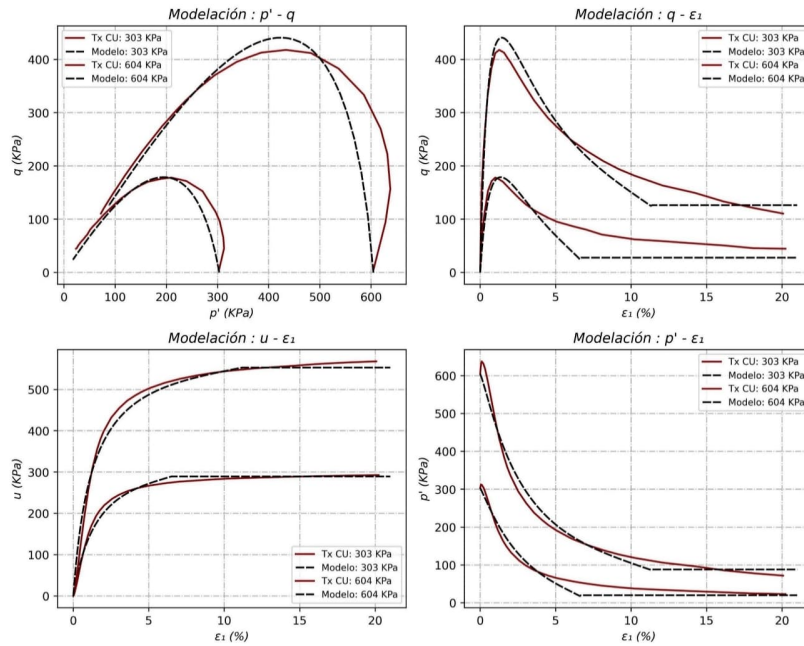


Figura 4-7: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M3

■ Muestra Te-AR-2024-M4 – Relave convencional

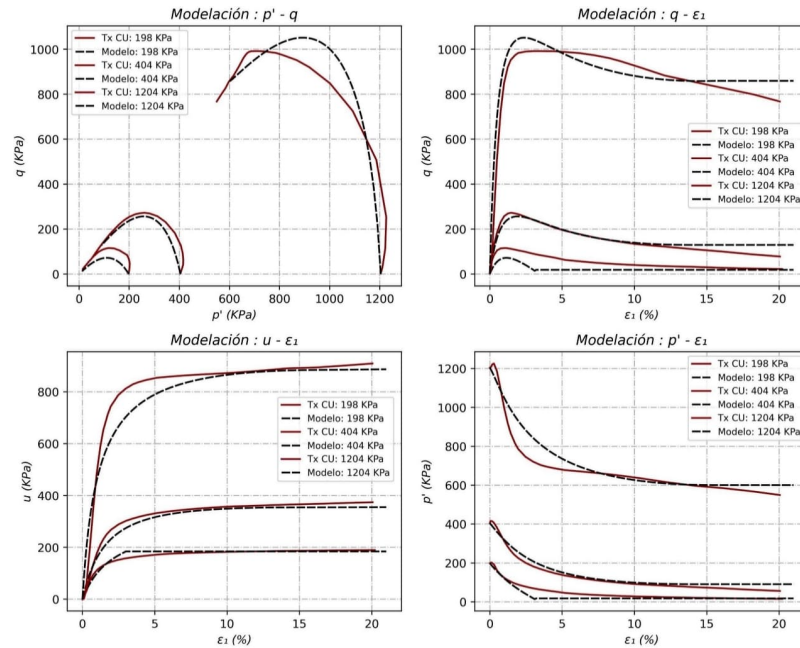


Figura 4-8: Trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ simulados por el modelo constitutivo optimizado y por ensayos triaxiales CIU de la muestra de relave Te-AR-2024-M4

Capítulo V: Modelación de licuación estática

En el presente capítulo se describe la determinación de la superficie de inestabilidad y la modelación de la licuación estática para cada uno de los relaves evaluados que presentan comportamiento contractivo frágil no drenado, utilizando el modelo constitutivo optimizado en la presente tesis.

5.1. Determinación de la superficie de inestabilidad

La superficie de inestabilidad o desencadenamiento de la licuación de flujo (FLS) es característica para materiales con comportamiento contractivo frágil bajo condiciones no drenadas. Estos materiales son susceptibles a desarrollar licuación estática al verse disminuida bruscamente su resistencia una vez alcanzada su resistencia máxima q_f .

La superficie de inestabilidad está definida por los puntos de resistencia o esfuerzo desviador máximo q_f en la trayectoria de esfuerzos $p' - q$, para cada esfuerzo de confinamiento ensayados a los relaves analizados. Estos puntos determinan la superficie inicio del desencadenamiento de licuación de flujo, donde el corte progresivo del material produce que comience a disminuir su resistencia de manera continua y brusca hasta llegar al estado crítico.

La Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4 muestran la superficie de inicio de licuación de flujo (líneas verdes discontinuas) en el campo $p' - q$ determinada a partir de los puntos de q_f (triaxiales CIU: cruces guindas, modelo: cruces negras) de cada uno de los relaves estudiados, en base a los resultados de los ensayos triaxiales no drenados y los calculados por el modelo constitutivo optimizado.

▪ Muestra Te-AR-2024-M1 – Relave cicloneado grueso

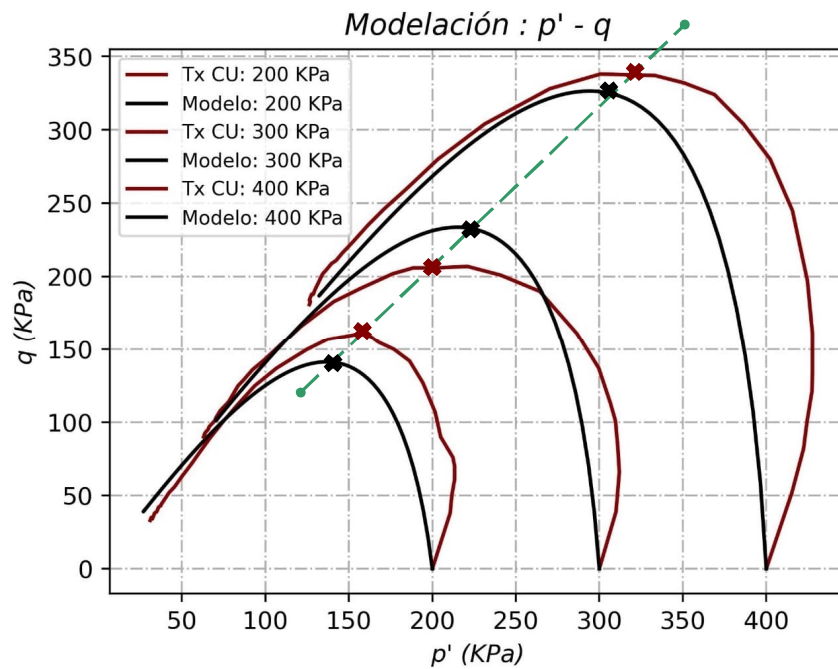


Figura 5-1: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M1

▪ Muestra Te-AR-2024-M2 – Relave convencional

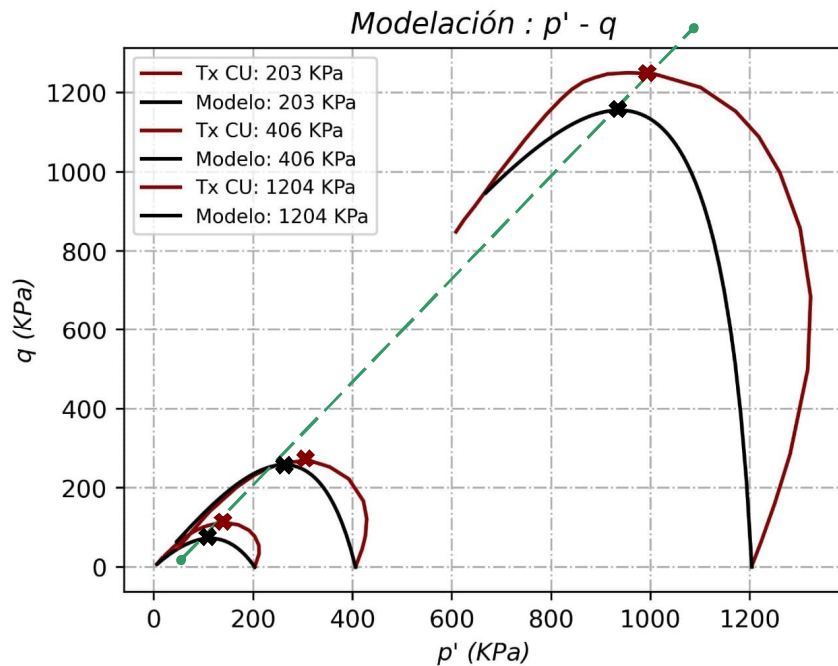


Figura 5-2: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M2

▪ Muestra Te-AR-2024-M3 – Relave convencional

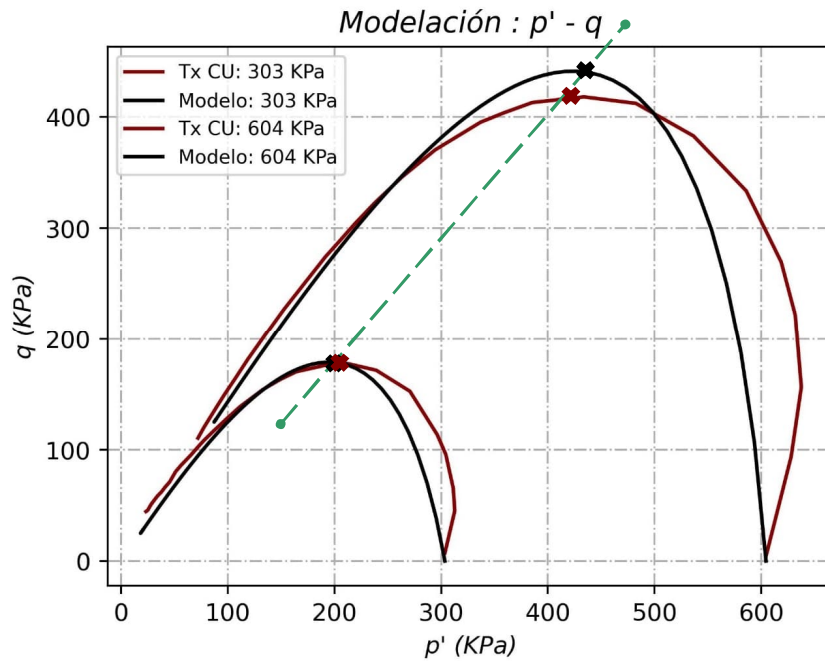


Figura 5-3: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M3

▪ Muestra Te-AR-2024-M4 – Relave convencional

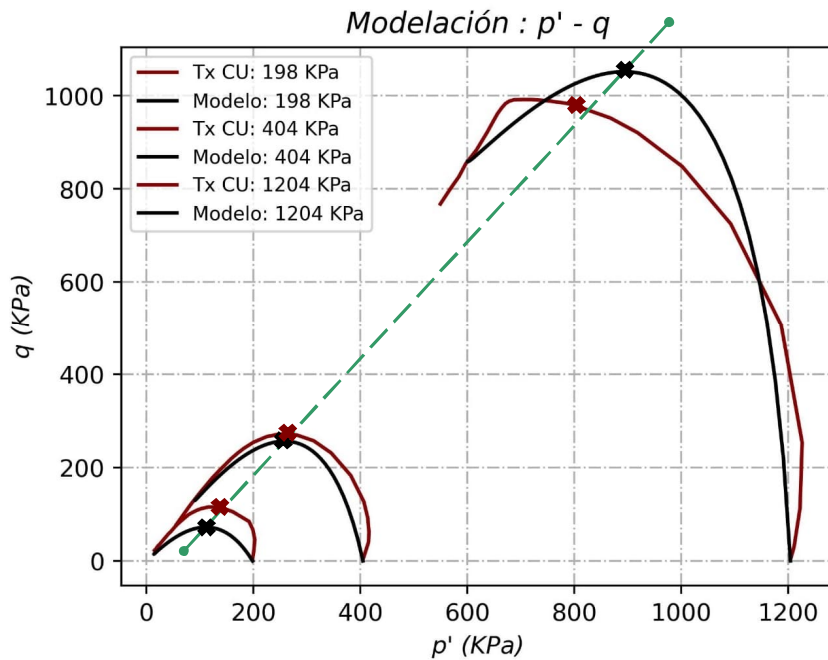


Figura 5-4: Superficie de inicio de licuación de flujo (FLS) – Muestra de relave Te-AR-2024-M4

5.2. Modelación de licuación estática

En este acápite se describe la modelación de la licuación estática para cada uno de los relaves evaluados, utilizando el modelo constitutivo optimizado propuesto en la presente tesis.

Los relaves seleccionados al presentar un comportamiento contractivo frágil bajo condiciones no drenadas son susceptibles a desarrollar el fenómeno de licuación estática. Se realizó la modelación de la licuación estática para cada uno de los materiales analizados con el modelo constitutivo optimizado, los campos de esfuerzos y deformaciones $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$ ayudan a mostrar la susceptibilidad a la licuación estática de los materiales; al ver el material llega a su resistencia máxima q_f a bajas deformaciones, luego disminuye su resistencia rápida y bruscamente $q_f \rightarrow q_{cs}$ en una variación de deformación $\Delta\varepsilon_{1_{q_f \rightarrow q_{min}}}$.

La Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 y Figura 5-8 muestran la modelación de licuación estática del modelo constitutivo optimizado y las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$ en base a los ensayos triaxiales CIU de cada uno de los relaves; se observa que la resistencia máxima o pico q_f se alcanza a deformaciones bajas $\sim 2\%$, a partir del cual la pérdida de resistencia es rápida, esto es indicativo de comportamiento frágil. Por ello, el modelo llegó a reflejar el comportamiento de fragilidad y susceptibilidad a la licuación estática de los relaves evaluados.

▪ Muestra Te-AR-2024-M1 – Relave cicloneado grueso

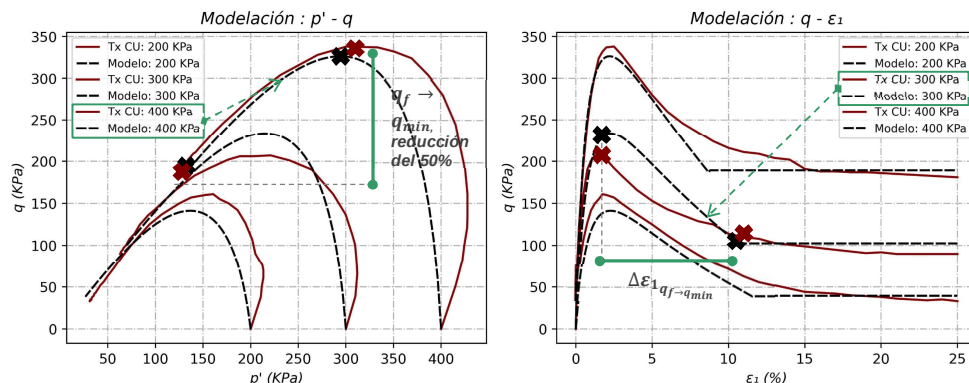


Figura 5-5: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M1

■ Muestra Te-AR-2024-M2 – Relave convencional

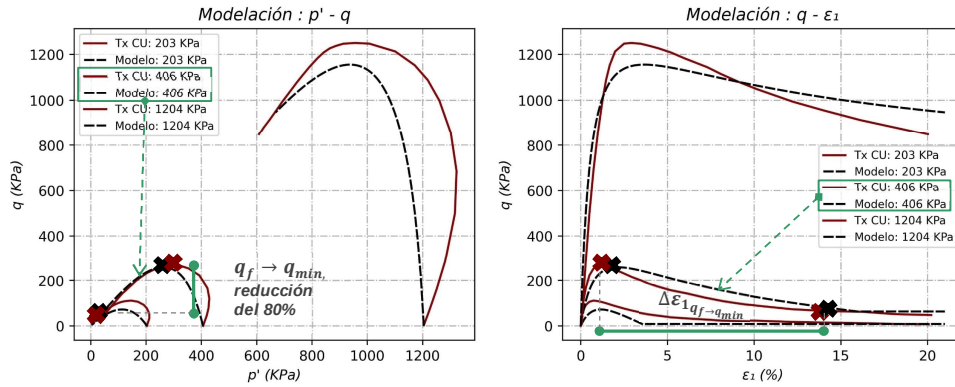


Figura 5-6: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M2

■ Muestra Te-AR-2024-M3 – Relave convencional

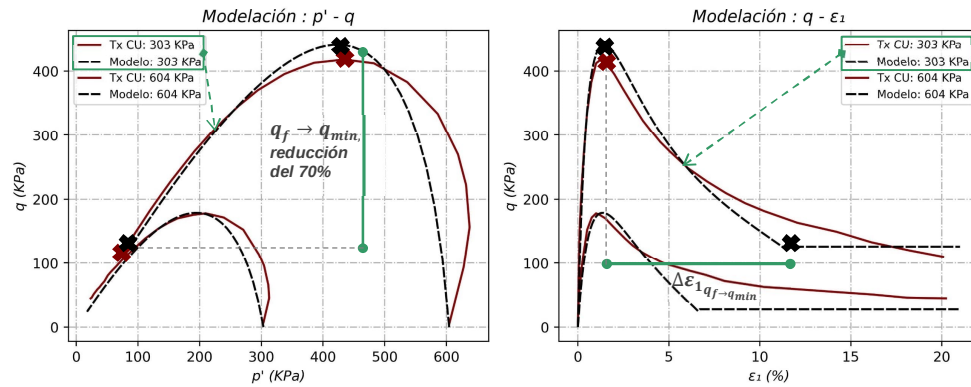


Figura 5-7: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M3

■ Muestra Te-AR-2024-M4 – Relave convencional

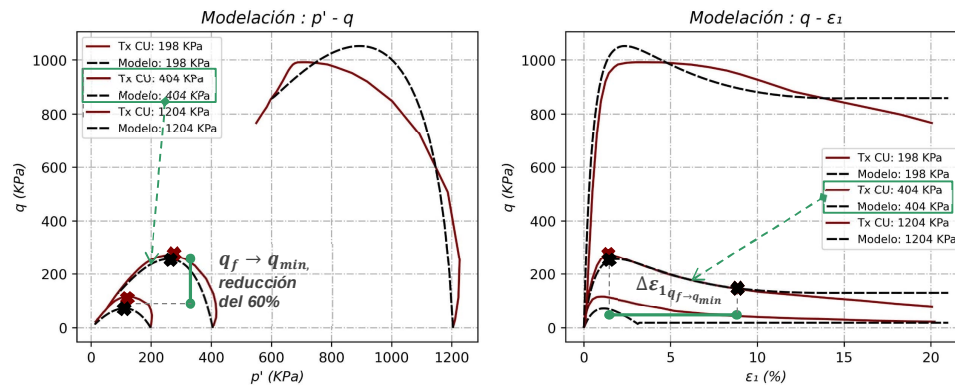


Figura 5-8: Modelización de la licuación estática – Muestra de relave Te-AR-2024-M4

Capítulo VI: Análisis de resultados

Los capítulos IV y V describen la calibración del modelo constitutivo optimizado y la modelación del fenómeno de licuación estática, respectivamente. En el presente capítulo se exponen los análisis y resultados obtenidos.

6.1. Comportamiento contractivo frágil

Se eligió cuatro (4) muestras distintas de relaves que presenten comportamiento contractivo frágil bajo corte no drenado. En estas condiciones, estos materiales son susceptibles a desarrollar licuación estática. El estudio del fenómeno de licuación estática a través del modelo constitutivo optimizado propuesto es el centro de presente investigación.

Como se describe en el acápite 4.4, el modelo constitutivo optimizado propuesto tiene la capacidad de capturar el fenómeno de licuación estática para materiales de relave, por ejemplo, se capturan aspectos como resistencia máxima q_f , resistencia residual q_{min} , generación de exceso de presión de poros u y otros, para distintas densidades y presiones de confinamiento (ver capítulo IV).

El comportamiento contractivo frágil de las muestras de relave Te-AR-2024-M1, Te-AR-2024-M2, Te-AR-2024-M3 y Te-AR-2024-M4 se muestran en la Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 y Figura 5-8, en los cuales los materiales de relave pierden su resistencia bruscamente de q_f a q_{min} . Este comportamiento frágil observado en los ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente no drenados CIU realizados en los relaves es capturado adecuadamente empleando el modelo constitutivo optimizado.

6.2. Ensayos triaxiales en el estado crítico

El modelo constitutivo optimizado contempla en su naturaleza y formulación la teoría del estado crítico; en virtud de ello, se eligió ensayos triaxiales que lleguen a este estado característico, en el cual el material se deforma a esfuerzos, velocidad y volumen constante.

El código realizado en lenguaje de programación Python ayudó a determinar las superficies de estado crítico en los campos $p' - q$ y $p' - e$ para cada una de las muestras de los distintos relaves evaluados (ver acápite 3.4).

Los parámetros relevantes determinados en el estado crítico son n_{cs} y la ecuación que determina la línea de estado crítico en el campo $p' - e$; los cuales se detallan en la Tabla 4-5. Es preciso e importante señalar que estos parámetros son input base del modelo constitutivo estudiado.

Las muestras de los distintos relaves llegaron al estado crítico; como una muestra de ello, en los recuadros verdes de la Figura 6-1 y Figura 6-2 se observan que las muestras de relave Te-AR-2024-M1 y Te-AR-2024-M3 llegaron al estado crítico en los espacios de esfuerzos p' y q – deformación ε_1 – presión de poros u .

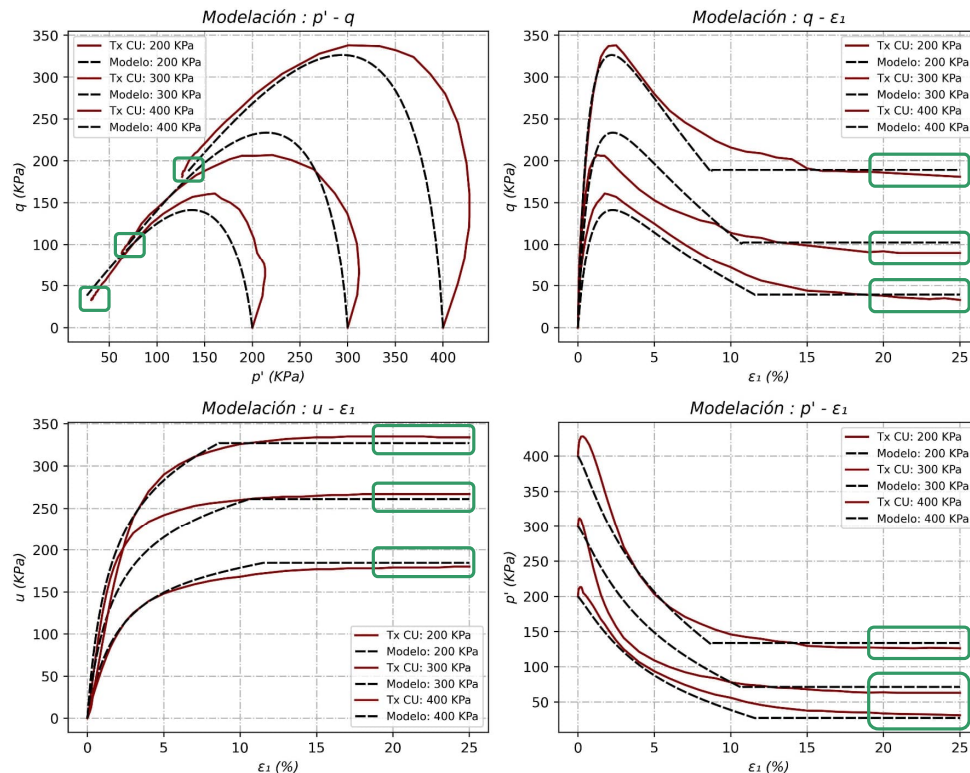


Figura 6-1: Estado crítico de la muestra del relave Te-AR-2024-M1 en las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$

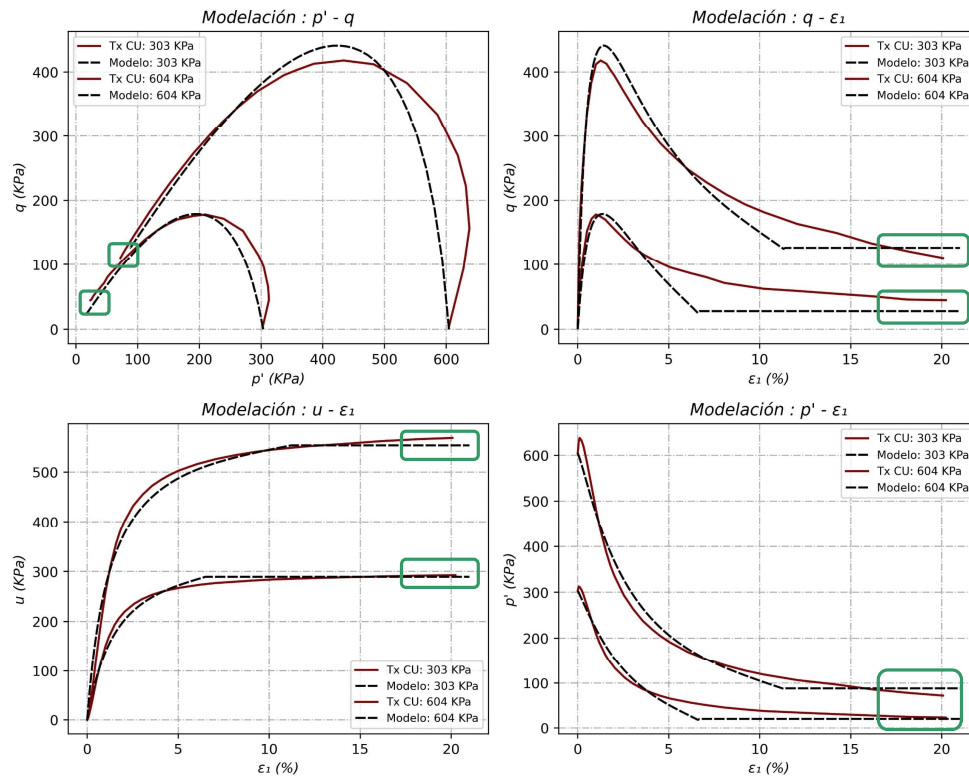


Figura 6-2: Estado crítico de la muestra del relave Te-AR-2024-M3 en las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$

6.3. Calibración del modelo constitutivo

Con el objetivo de poder modelar y evaluar la licuación estática de relaves, se calibró el modelo constitutivo optimizado; para ello se creó un código propio realizado en lenguaje de programación Python buscando evaluar todos los sets de parámetros posibles para refinar la calibración, se iteró ciento veinte mil (120 000) sets de parámetros posibles, determinando finalmente el set de parámetros que mejor calibra al modelo constitutivo optimizado (ver acápite 4.4).

La Figura 6-3, Figura 6-4, Figura 6-5 y Figura 6-6, muestran que el modelo constitutivo optimizado calibró de muy buena forma los ensayos triaxiales CIU en las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$, $\varepsilon_1 - u$ y $\varepsilon_1 - p'$ de los distintos relaves evaluados.

Asimismo, la Tabla 6-1 presenta un resumen comparativo de los valores importantes q_f , q_{min} , u_f y p'_{min} mostrando una buena calibración del modelo

propuesto con respecto a los ensayos de laboratorio ejecutados en cada uno de los relaves para los diferentes esfuerzos de confinamiento σ'_c evaluados.

Tabla 6-1: Valores importantes calibrados del modelo optimizado de los relaves evaluados

Muestra	σ'_c (kPa)	ε_1 (%)	q_f (kPa) ¹	q_{cs} (kPa) ¹	u_f (kPa) ¹	p'_{min} (kPa) ¹
Te-AR-2024-M1	200	25.0	155; 145	38; 39	178; 180	26; 25
	300	25.0	205; 230	90; 92	265; 262	70; 75
	400	25.0	335; 325	175; 177	334; 332	125; 130
Te-AR-2024-M2	203	21.0	100; 75	0; 0	200; 200	0; 0
	406	21.0	255; 250	50; 50	375; 375	50; 50
	1204	21.0	1 250; 1 170	840; 850	875; 875	600; 620
Te-AR-2024-M3	303	21.0	175; 175	50; 40	290; 290	25; 25
	604	21.0	440; 480	120; 125	560; 550	85; 90
Te-AR-2024-M4	198	21.0	50; 100	25; 25	182; 180	15; 15
	404	21.0	250; 255	100; 100	380; 360	100; 65
	1204	21.0	995; 1 045	995; 1 050	900; 880	560; 600

Nota:

1. Los valores q_f , q_{min} , u_f y p'_{min} se describen en base a los resultados del ensayo triaxial (izquierda) y calculados por modelo constitutivo optimizado (derecha) para los distintos confinamientos testeados en cada muestra de relave.

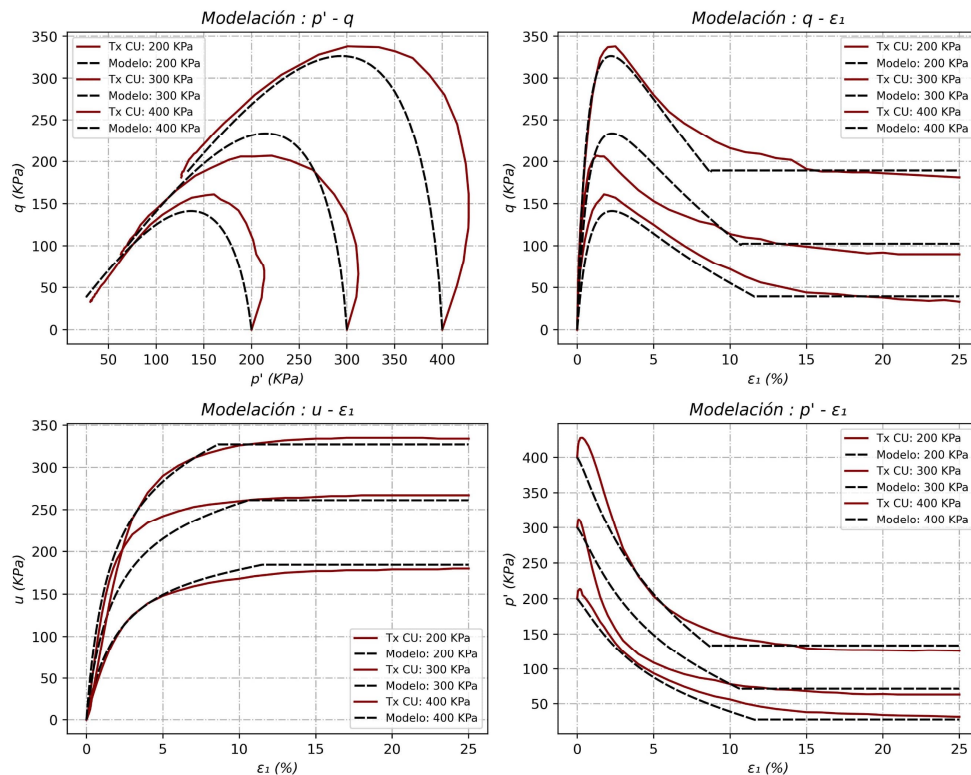


Figura 6-3: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M1

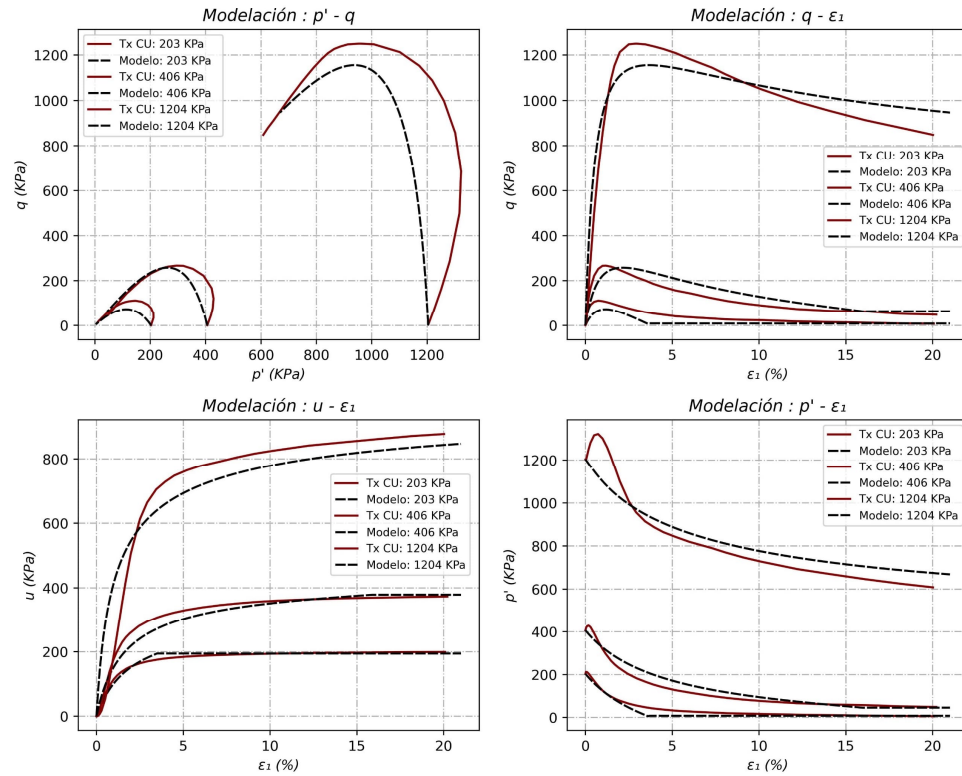


Figura 6-4: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M2

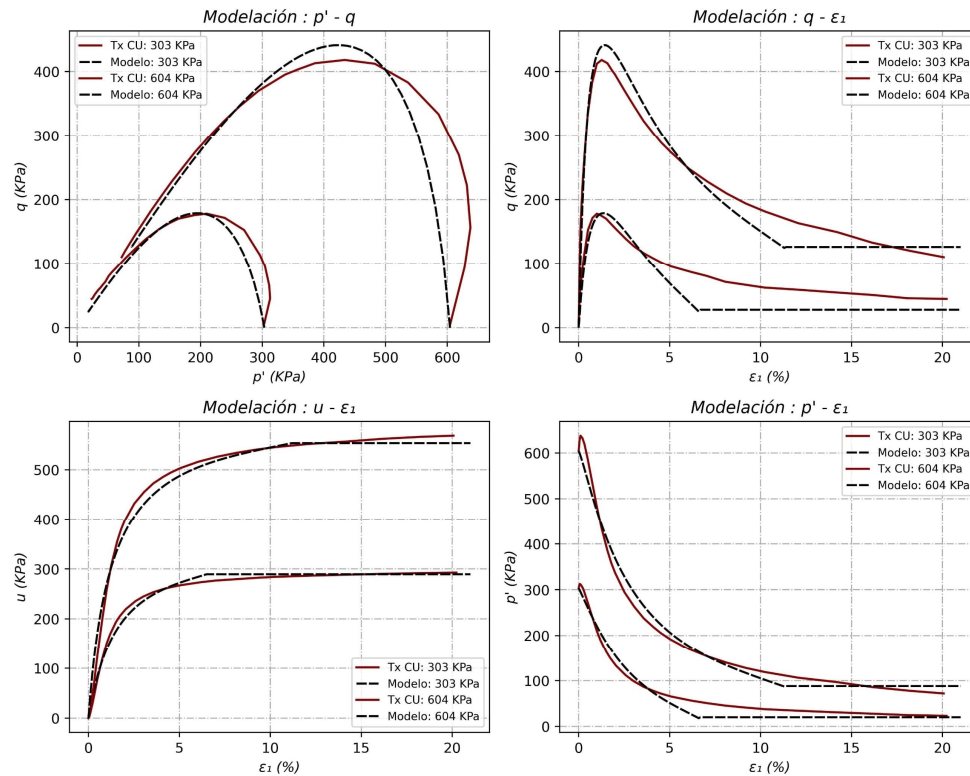


Figura 6-5: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M3

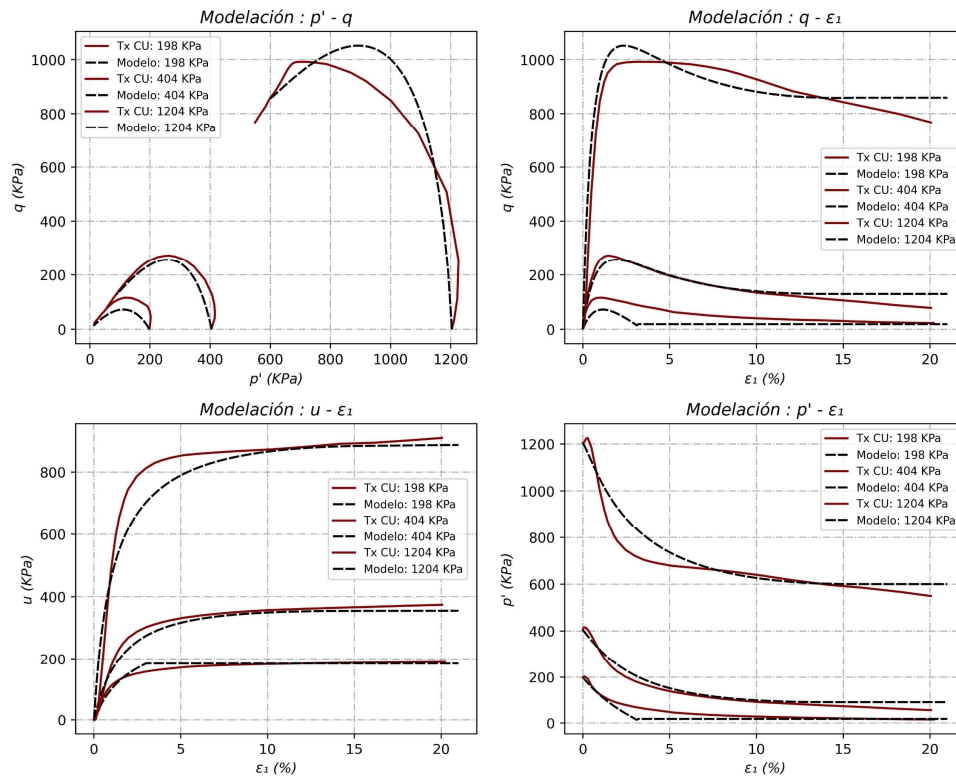


Figura 6-6: Calibración del modelo constitutivo optimizado – Muestra de relave Te-AR-2024-M4

Es importante recordar que para calibración del modelo con el código creado en Python se consideró la parte de la trayectoria $p' - q$ desde p'_{qf} a p'_{cs} ; debido a que las muestras ensayadas triaxialmente mostraron una moderada dilatación a bajas deformaciones y los modelos que evalúan la licuación estática como el modelo constitutivo estudiado, no describen este comportamiento a bajas deformaciones para condiciones no drenadas; como se detalla en el acápite 4.4.

6.4. Determinación de la superficie de inestabilidad

Se determinó la superficie de inestabilidad de las muestras Te-AR-2024-M1, Te-AR-2024-M2, Te-AR-2024-M3 y Te-AR-2024-M4 de los distintos relaves ensayados, con la finalidad de conocer el inicio del fenómeno de licuación estática de los relaves a evaluar y saber para qué condiciones de esfuerzos p' y q bajo condiciones no drenadas los relaves evaluados llegan a la superficie de inestabilidad, comenzando el desencadenamiento de la licuación de flujo.

Como se describe detalladamente en el acápite 5.1, la superficie de inestabilidad es determinada por las resistencias o esfuerzos desviadores máximos q_f de cada uno de los ensayos triaxiales no drenados ejecutados en cada muestra de relave.

La Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4 dejan notar que todas las muestras de cada uno de los relaves evaluados presentan una superficie de inestabilidad (FLS), consecuentemente son susceptibles a presentar licuación estática bajo condiciones de esfuerzos específicos; fenómeno de evaluación en la presente tesis.

6.5. Modelación de licuación estática

El objetivo y finalidad de la presente investigación es la modelación y evaluación de la licuación estática para materiales de relave con un modelo constitutivo optimizado.

El acápite 5.2 describe de manera detallada la modelación de la licuación estática con el modelo estudiado, la Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 y Figura 5-8 muestran las trayectorias $p' - q$, $\varepsilon_1 - q$ de cada uno de las muestras, donde se observa que el modelo fue calibrado y pudo reflejar el fenómeno de la licuación estática para cada uno de los relaves evaluados.

De los resultados obtenidos, se puede mencionar que el modelo constitutivo optimizado logró ser calibrado adecuadamente con ensayos triaxiales no drenados CIU de cada muestra de relave, asimismo, mostró su capacidad de evaluar el fenómeno de licuación estática para muestras de relave susceptibles a desarrollar este fenómeno, es decir, con comportamiento contractivo frágil en condiciones no drenadas.

Conclusiones

- El modelo constitutivo optimizado incluyó numéricamente los esfuerzos en el estado crítico como condición última, esto se plasmó en las ecuaciones (16a) y (16b); es importante esta inclusión porque permite al modelo detener la evolución de los parámetros p' , q , u y mantenerlos constantes cuando el material de relave llega al estado crítico.
- Se simplificó y optimizó las formulaciones de B y G , asimismo, en la formulación de dp' se agregó un término negativo que incluye en su formulación la distancia entre la relación de esfuerzos y su símil en el estado crítico ($n_{cs} - n$), y la deformación de corte plástico $d\varepsilon_s^p$ (ver acápite 3.3.1 y 3.3.2); mejorando sustantivamente la correcta captura de la evolución de p' a medida que el material experimenta deformación de corte.
- Se creó un código propio en lenguaje de programación Python, agilizando las iteraciones del modelo y determinando el set de parámetros que calibra mejor modelo constitutivo simulando la licuación estática de los relaves evaluados. El código itera 120 000 sets posibles y encuentra el set de parámetros independientes que mejor lo calibra, es decir, el que tiene menor desviación cuadrática total entre los valores q , u generados por el modelo y los obtenidos en los ensayos triaxiales CIU (ver acápite 4.4.1).
- Se determinó los parámetros independientes $u_1 = 1.40$, $u_2 = 0.65$, $\alpha = \beta = 0.20$ y $x_2 = 1.00$; estos son constantes para el modelo constitutivo optimizado al evaluar la licuación estática de relaves.
 - o Los parámetros constantes u_2 y α generan que los exponentes de σ'_c y p' de la formulación de dn (ecuación 13c) sean únicos para un material de relave, en consecuencia, dn queda definida por G_u , p' , n_f , n y $d\varepsilon_s^p$.
 - o Los parámetros constantes u_1 y β hacen que los exponentes de σ'_c y p' del primer término de la formulación de dp' (ecuación 14e) sean únicos para un material de relave. Además, el parámetro constante x_2 hace que $d\varepsilon_s^p$ del segundo término de dp' tenga una variación lineal; por lo tanto, dp' queda definida por B_u , p' , n_f , n , n_{cs} , C_p , x_1 y $d\varepsilon_s^p$.

- Los rangos típicos de los valores admisibles de los parámetros independientes del modelo constitutivo optimizado para evaluar licuación estática de relaves determinados en la presente tesis son,
 - o B_u debe estar entre un valor de 1.50 y 15.50
 - o G_u debe estar entre un valor de 0.10 y 25.00
 - o m debe estar entre un valor de 0.00100 y 0.13250
 - o C_p debe estar entre un valor de 0 y 15 000
 - o x_1 debe estar entre un valor de 0.95 y 1.15
- El modelo constitutivo optimizado logró simular el fenómeno de licuación estática por medio de las calibraciones realizadas con código creado en la presente tesis, detalladas en el acápite 6.3. Muestra de este logro, la Tabla 6-1 detalla la comparación entre los valores importantes que caracterizan el comportamiento de un material q_f , q_{min} , u_f y p'_{min} , obtenidos de los ensayos triaxiales no drenados y los determinados por el modelo constitutivo optimizado para las muestras Te-AR-2024-M1, M2, M3 y M4 evaluadas; resultando en promedio una desviación del 4%, 3%, 5% y 14% para cada muestra de relave, respectivamente. Asimismo, las Figura 6-3, Figura 6-4, Figura 6-5, Figura 6-6 muestran que los materiales de relave tienen un comportamiento contractivo frágil, susceptibles a presentar licuación estática; finalmente, el modelo logró calibrar los ensayos triaxiales CIU de las muestras de relaves en cuanto a la evolución de la trayectoria de esfuerzos–deformación–presión de poros.
- La superficie de inestabilidad (FLS) obtenida a partir de los ensayos triaxiales para las muestras de relaves con comportamientos contractivos frágiles han podido ser reproducidas con el modelo constitutivo optimizado. Esta superficie tiene implicancias útiles en la modelación, diseño y medidas a tomar (Sladen, J. A., D'hollander, R. D., & Krahn, J., 1985) en una estructura de gran envergadura como un depósito de relaves susceptible a experimentar el fenómeno de licuación estática.

Recomendaciones

- El programa de ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente CID y CIU deben tener la concepción de determinar la línea de estado crítico (CSL), debido a que el modelo propuesto está basado en la teoría de estado crítico y necesita parámetros input de estos ensayos; para poder evaluar comportamientos importantes y fenómenos relevantes como la licuación estática.
- De evaluar la licuación estática con el modelo optimizado propuesto para confinamientos mayores a 1.20 MPa como es el caso en algunas estructuras en minería, se recomienda realizar una nueva investigación y/o extender o complementar esta tesis y evaluar el modelo para estos grandes confinamientos. Debido a que esta tesis abordó la simulación del fenómeno de licuación estática con el uso de un modelo propuesto en base a ensayos triaxiales en materiales de relave con esfuerzos de confinamiento menores a 1 217 kPa, que es típicamente el máximo confinamiento en el que se ejecutan los ensayos triaxiales convencionales.
- Extrapolar la formulación del modelo propuesto de tal manera que capture otros comportamientos como el dilatante o la transición de fase entre un comportamiento contractivo y dilatante, asimismo, para evaluar el desempeño de otros materiales granulares susceptibles a desarrollar el fenómeno de licuación estática.
- Codificar matemáticamente el modelo propuesto en un módulo o software de elementos o diferencias finitas si se pretende determinar deformaciones, esfuerzos y presión de poros de una estructura bidimensional y evaluar su serviciabilidad. Asimismo, si se desea evaluar su capacidad y confiabilidad del modelo propuesto en sus resultados de deformación y esfuerzos, se recomienda compararlo con otro modelo usado en la práctica ingenieril como el modelo NorSand.
- Para futuras investigaciones se recomienda tomar como base el modelo optimizado propuesto y se use como un punto de partida los rangos típicos de valores de los parámetros independientes y los parámetros constantes definidos en la presente tesis para simular y evaluar la licuación estática en otros materiales granulares, analizar otros tipos de comportamientos o fenómenos geotécnicos.

Referencias bibliográficas

- Armacanqui, A. (2021). *Análisis dinámico de una presa de relaves mediante modelamiento numérico con el modelo UBCSAND*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22070>
- Advancing Standards Transforming Markets (2020). ASTM D4767-11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Soils. In *Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken*, 4(8). <https://doi.org/10.1520/D4767-11R20>
- Advancing Standards Transforming Markets (2020). ASTM D7181-20 Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. In *Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken*, 4(9). <https://doi.org/10.1520/D7181-20>
- Been, K. & Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*. 35(2), 99–112. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.2.99>
- Been, K., Jefferies, M. & Hachey, J. (1991). The critical state of sands. *Géotechnique*, 41(3), 365–381. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.3.365>
- Borja, R. I. (1991). Cam-Clay plasticity, Part II: Implicit integration of constitutive equation based on a nonlinear elastic stress predictor. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(2), 225-240. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90256-6](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90256-6)
- Borja, R. & Lee, S. (1990). Cam-clay plasticity, Part I: implicit integration of elasto-plastic constitutive relations. *Computer Methods in applied mechanics and engineering*, 78(1), 49-72. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(90\)90152-C](https://doi.org/10.1016/0045-7825(90)90152-C)
- Boulanger, R. & Ziotopoulou, A. (2015). *PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications*. UC Davis Center for Geotechnical Modeling. https://www.researchgate.net/profile/Katerina-Ziotopoulou/publication/273694951_PM4Sand_Version_3_A_Sand_Plasticity_Model_for_Earthquake_Engineering_Applications/links/5508f6ca0cf2d7a2812b8838/PM4Sand-Version-3-A-Sand-Plasticity-Model-for-Earthquake-Engineering-Applications.pdf
- Cárdenas, J. (2004). *Estudo de modelos constitutivos para Previsão da Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico*. [Dissertação de Mestrado, PUC-

- Rio, Rio de Janeiro], Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.5729>
- Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 257–276.
- Castellón, J. (2013). *Análisis teórico, numérico y experimental del comportamiento de suelos en el rango de las pequeñas deformaciones*. [Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Catalunya]. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20758>
- Castro, G. (1969). Liquefaction of sands. [Thesis of Doctor of Philosophy. Harvard University].
- Chinchay, D. (2017). *Análisis en elementos finitos con el modelo UBCSAND de ensayos triaxiales monotónicos en arenas para evaluar licuación*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/9215>
- Chinchay, G. (2017). *Análisis numérico del comportamiento de arenas en ensayos triaxiales monotónicos mediante el empleo del modelo constitutivo UBCSAND*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2118>
- Damian, D. (2022). *Estudio experimental para estimar la curva de estado crítico para relaves mediante el uso del equipo triaxial estándar instrumentado*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/27716>
- Figueroa, A., Solans, D., Gonzalez, C. y Campaña, J. (2017). Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central. *Obras y Proyectos*, (21), 30-37. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132017000100004>
- Fourie, A. (2019, from November 17 to 19). Static Liquefaction of Tailings Introduction [conference]. *Tailings and Mine Waste 2019*, Vancouver, Canada. https://tailingsandminewaste.com/2019/Proceedings_of_Tailings_and_Mine_Waste_2019-Revised_7Mar2021.pdf

- Fourie, A., Verdugo, R., Bjelkevik, A., Torres-Cruz, L. A. & Znidarcic, D. (2022, from May 1 to 5). Geotechnics of mine tailings: a 2022 state of the art [conference]. In *Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Sydney, Australia. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/120/20ICSMGE_SoA_4_Fourie_et_al.pdf
- Gamarra, M. & Gil, L. (2015). *Inventario de presas en el Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2424>
- Gutiérrez, M. & Verdugo R. (1995). Analysis of flow and liquefaction of sand via a simple model. In *Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*. Ed. Ishihara, Balkema, Rotterdam, 2, 893-898.
- Guzmán, A. (1987). Mecanismos de licuación y flujo de suelos granulares durante sismos. *Ingeniería e Investigación*, (16), 44-54. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4902737>
- Hinojosa, P. (2022). *Control operacional y geotécnico en el depósito de relaves enlozada de sociedad minera Cerro Verde S.A.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15202>
- International Commission on Large Dams. (2022). *Tailings Dam Safety – Bulletin N°194* (1).
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-451. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- Ishihara, K., Tatsuoka, F. & Yasuda, S. (1975). Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and Foundations*, 15(1), 173–188. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.2>
- Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In *Proc. European Conf. SMFE, Wiesbaden*, 1, 19-25.
- Jefferies, M. G. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1), 91-103. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.1.91>
- Jefferies, M. & Been, K. (2015). *Soil Liquefaction, A Critical State Approach*. (2a ed.) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19114>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. (2a ed) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003512011>

- Li, J. & Leao, T. (2018). Application of NorSand constitutive model in a highway fill embankment slope stability failure study. *Civil Eng J.*, 4(10), 2252-2263. <https://doi.org/10.28991/cej-03091155>
- Macedo Escudero, J. (2009). *Análisis dinámico de la presa Yuracmayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/416>
- Macedo, J. L. (2020, del 30 de junio al 3 de julio). Licuación estática, perspectiva desde la teoría de estado crítico [conferencia]. *Ciclo de Conferencias de Relaves, Sociedad Peruana de Geoingeniería SPEG/ISRM*, Lima, Perú.
- Mánica, M. A., Arroyo, M., Gens, A., & Monforte, L. (2022). Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 175(2), 151-165. <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00001>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Minería se mantiene como principal fuente de divisas del país* (07). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1278017/Bolet%C3%ADn%20Estad%C3%ADstico%20Minero%20Edici%C3%B3n%20N%C2%B0%2007-2020.pdf>
- Morrison, K. F. (2022). *Tailings management handbook: A lifecycle approach*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. <https://store.smenet.org/1vmff1t/#>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. *Washington, DC: The National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/23474>
- Olaya, F., Chávez, J. & Lara, J. (2015, from 19 to 21 august). Post-liquefaction stability of thickened tailings-a critical state approach [conference]. *Tailings 2015*, Santiago, Chile.
- Osorio, B. (2009). *Resistencia Estatica y Ciclica de relaves integrales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103414>
- Ossandón, E. & Alvarado, R. (2012). Comportamiento Monótono y Cíclico de Relaves Integrales de Minas de Cobre. <http://vu2018.admin.hosting.ing.udec.cl/descargas/7.pdf>

- Rangel-Reyes, R. (2022). Análisis de la licuefacción estática: Presas de Edenville y Sanford. *Revista Científica Unanchay*, 1(1), 83-96. <https://tecnoecuadoriano.edu.ec/revistaunanchay/index.php/RCU/article/download/19/7>
- Reid, D. (2019). Additional analyses of the Fundao tailings storage facility: in situ state and triggering conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11), 04019088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002123)
- Reinoso P. & Olalla C. (2018). Presas de residuos mineros: causas de fallo y propuestas para evitarlos. *Revista Digital del Cedex*, 7(186). <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/24>
- Rivas, N., Sottile, M., Rivarola, F. & Sfriso, A. (2023, from November 5 to 8). Comparing HSS and NorSand constitutive models for modeling flow liquefaction in tailings dams [conference]. In *1st International Conference of Tailings and Mine Waste*, Vancouver, Canada. <https://drive.google.com/file/d/1C5dPsnOcksRHrhtkpPZdcGWdt27TRCig/view>
- Rojas, R. A. (2016). *Implementación de ensayos de compresión triaxial CIU y CID en laboratorio LEMCO para posterior análisis de resultados mediante la teoría del estado crítico* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Digital USM. <http://hdl.handle.net/11673/23588>
- Roman, B. (2019). Estudio del comportamiento monotónico no drenado de relaves de aluminio. In *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 2063-2070. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190267>
- Roman, B. (2020, from February 25 to 28). An Experimental Study on the Post-Liquefaction Shear Strength of Aluminum Tailings. In *Geo-Congress*, 208-214. <https://doi.org/10.1061/9780784482810.023>
- Roscoe, K. & Burland, J. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. 535-609.
- Rotta, L., Alcântara, E., Park, E., Negri, R., Lin, Y., Bernardo, N. & Souza, C. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

- Sadrekarami, A. (2019, from September 29 to October 2). Prediction of static liquefaction landslides [conference]. *The 2019 GeoSt.John's conference*, Newfoundland & Labrador, Canada. <https://core.ac.uk/reader/286340460>
- Sadrekarami, A. & Riveros, G. (2020). Static liquefaction analysis of the Fundão dam failure. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 6431-6446.
- Sladen, J., D'hollander, R. & Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian geotechnical journal*, 22(4), 564-578. <https://doi.org/10.1139/t85-076>
- Sottile, M., Tasso, N. & Sfriso, A. (2021, del 24 al 26 de Noviembre). Evaluación del potencial de licuación por acción sísmica mediante el uso de modelación numérica [conferencia]. In *XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Misiones, Argentina. https://cdn-web-content.srk.com/upload/user/image/AR_Evaluaci%C3%B3n%20del%20potencial%20de%20licuaci%C3%B3n%20por%20acci%C3%B3n%20s%C3%ADsmica%20mediante%20el%20uso%20de%20modelaci%C3%B3n%20num%C3%A9rica20211124124032387.pdf
- Tolozza, P. (2018). Liquefaction modelling using the PM4Sand constitutive model in Plaxis 2D [Undergraduate thesis, Delft University of Technology]. Repository Tudelf. https://repository.tudelft.nl/file/File_c4b29b24-27cc-41b6-8efb-7da75ea505b1?preview=1
- Verdugo, R., & Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and foundations*, 36(2), 81-91. https://doi.org/10.3208/sandf.36.2_81
- Vergaray, L., Macedo, J., Cody, A. & Arroyo, M. (2022, from November 6 to 9). Influence of the particle size distribution on the Critical State Properties of Mine Tailings [conference]. In *Tailings and Mine Waste'22: Proceedings of the 26th International Conference on Tailings and Mine Waste*, 357-367, Denver, Colorado. <http://hdl.handle.net/2117/385389>
- Vilcahuamán, P. J. P., Huertas, J. C., & Romanel, C. (2018, de 28 de Agosto a 01 de Setembro). Potencial de Liquefação Dinâmica em Barragem de Rejeitos [conferência]. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano*, Bahia, Brasil. https://www.researchgate.net/profile/Paul-Jose-Pinedo-Vilcahuaman/publication/334315886_Potencial_de_Liquefacao_Dinamica

em Barragem de Rejeitos/links/5d23f60592851cf440727ec7/Potencial-de-Liquefacao-Dinamica-em-Barragem-de-Rejeitos.pdf

- Villanueva Jiménez, A. M. (2015). *Simulación numérica de la construcción del depósito de relaves filtrados Ramahuayco y validación de los parámetros del modelo constitutivo representativo*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/2558>
- 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. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199808\)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199808)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8)
- Zheng, L., Jin, L. & Liu, F. (2022). NorSand modelling for evaluating the triggering of flowslides in loess [conference]. In *Proceedings of the 75th Canadian Geotechnical Conference. Presented at the GeoCalgary*. University of Alberta, Edmonton, Canada. https://www.researchgate.net/profile/Liming-Zheng/publication/385558653_NorSand_modelling_for_evaluating_the_triggering_of_flowslides_in_loess/links/672aa127db208342deece52c/NorSand-modelling-for-evaluating-the-triggering-of-flowslides-in-loess.pdf
- Zhu, F., Zhang, W. & Puzrin, A. (2024). The slip surface mechanism of delayed failure of the Brumadinho tailings dam in 2019. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 33. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01086-9>

Anexos

Anexo 1: Ensayos triaxiales drenados y no drenados de las muestras de relave evaluadas

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
 Descripción: Relave cicloneado grueso
 Código: Te-AR-2024-M1
 SUCS: SP
 LL, LP, IP: NP, NP, NP
 Elaborado: Ríos, Anibal
 Año: 2021

Densidad: 1.34 g/cm^3
 Humedad: 5%
 Gs: 2.96
 σ'_c : 400 kPa
 Parámetro B: 0.96

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.00	-	0.00	400.00	0.819
0.05	37.68	-	0.00	412.56	0.815
0.10	65.63	-	0.00	421.88	0.811
0.15	84.15	-	0.00	428.05	0.807
0.20	101.78	-	0.00	433.93	0.803
0.25	114.41	-	0.00	438.14	0.799
0.35	136.13	-	0.00	445.38	0.795
0.50	163.71	-	0.00	454.57	0.791
0.75	204.44	-	0.00	468.15	0.787
1.00	237.21	-	0.00	479.07	0.783
1.25	269.36	-	0.00	489.79	0.780
1.50	299.41	-	0.00	499.80	0.776
1.75	329.4	-	0.00	509.80	0.772
2.00	357.29	-	0.00	519.10	0.768
2.50	410.53	-	0.00	536.84	0.764
3.00	459.75	-	0.00	553.25	0.760
4.00	554.11	-	0.00	584.70	0.756
5.00	631.19	-	0.00	610.40	0.752
6.00	703.06	-	0.00	634.35	0.748
7.00	768.64	-	0.00	656.21	0.744
8.00	825.05	-	0.00	675.02	0.740
9.00	877.17	-	0.00	692.39	0.736
10.00	929.1	-	0.00	709.70	0.732
11.00	973.96	-	0.00	724.65	0.728
12.00	1012.79	-	0.00	737.60	0.724
13.00	1049.63	-	0.00	749.88	0.720
14.00	1086.72	-	0.00	762.24	0.716
15.00	1115.73	-	0.00	771.91	0.712
16.00	1142.78	-	0.00	780.93	0.709
17.00	1167.6	-	0.00	789.20	0.705
18.00	1188.34	-	0.00	796.11	0.701
19.00	1205.09	-	0.00	801.70	0.697
20.00	1220.73	-	0.00	806.91	0.693
21.00	1234.22	-	0.00	811.41	0.689
22.00	1238.99	-	0.00	813.00	0.685
23.00	1244.66	-	0.00	814.89	0.681
24.00	1239.16	-	0.00	813.05	0.677
25.00	1232.58	-	0.00	810.86	0.673

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
 Descripción: Relave cicloneado grueso
 Código: Te-AR-2024-M1
 SUCS: SP
 LL, LP, IP: NP, NP, NP
 Elaborado: Ríos, Anibal
 Año: 2021

Densidad: 1.34 g/cm^3
 Humedad: 5%
 Gs: 2.96
 σ'_c : 200 kPa
 Parámetro B: 0.95

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.00	0.000	0.00	200.00	0.843
0.05	38.00	0.000	2.00	210.67	0.843
0.10	50.00	0.000	5.00	211.67	0.843
0.15	61.00	0.000	7.00	213.33	0.843
0.20	70.00	0.000	10.00	213.33	0.843
0.25	76.00	0.000	13.00	212.33	0.843
0.35	90.00	0.000	25.00	205.00	0.843
0.50	107.00	0.000	34.00	201.67	0.843
0.75	127.00	0.000	48.00	194.33	0.843
1.00	142.00	0.000	61.00	186.33	0.843
1.25	150.00	0.000	73.00	177.00	0.843
1.50	155.00	0.000	84.00	167.67	0.843
1.75	161.00	0.000	93.00	160.67	0.843
2.00	160.00	0.000	101.00	152.33	0.843
2.50	157.00	0.000	115.00	137.33	0.843
3.00	150.00	0.000	125.00	125.00	0.843
4.00	137.00	0.000	139.00	106.67	0.843
5.00	125.00	0.000	148.00	93.67	0.843
6.00	112.00	0.000	154.00	83.33	0.843
7.00	100.00	0.000	159.00	74.33	0.843
8.00	89.00	0.000	163.00	66.67	0.843
9.00	79.00	0.000	166.00	60.33	0.843
10.00	72.00	0.000	168.00	56.00	0.843
11.00	63.00	0.000	171.00	50.00	0.843
12.00	56.00	0.000	173.00	45.67	0.843
13.00	52.00	0.000	175.00	42.33	0.843
14.00	48.00	0.000	176.00	40.00	0.843
15.00	44.00	0.000	177.00	37.67	0.843
16.00	43.00	0.000	177.00	37.33	0.843
17.00	42.00	0.000	178.00	36.00	0.843
18.00	40.00	0.000	178.00	35.33	0.843
19.00	39.00	0.000	178.00	35.00	0.843
20.00	38.00	0.000	179.00	33.67	0.843
21.00	36.00	0.000	179.00	33.00	0.843
22.00	35.00	0.000	179.00	32.67	0.843
23.00	34.00	0.000	179.00	32.33	0.843
24.00	35.00	0.000	180.00	31.67	0.843
25.00	33.00	0.000	180.00	31.00	0.843

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
 Descripción: Relave cicloneado grueso
 Código: Te-AR-2024-M1
 SUCS: SP
 LL, LP, IP: NP, NP, NP
 Elaborado: Ríos, Anibal
 Año: 2021

Densidad: 1.34 g/cm³
 Humedad: 5%
 Gs: 2.96
 σ'_c : 300 kPa
 Parámetro B: 0.95

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.00	0.000	0.00	300.00	0.794
0.05	39.00	0.000	3.00	310.00	0.794
0.10	66.00	0.000	10.00	312.00	0.794
0.15	84.00	0.000	17.00	311.00	0.794
0.20	101.00	0.000	24.00	309.67	0.794
0.25	113.00	0.000	31.00	306.67	0.794
0.35	137.00	0.000	46.00	299.67	0.794
0.50	161.00	0.000	67.00	286.67	0.794
0.75	190.00	0.000	99.00	264.33	0.794
1.00	201.00	0.000	126.00	241.00	0.794
1.25	207.00	0.000	148.00	221.00	0.794
1.50	206.00	0.000	166.00	202.67	0.794
1.75	206.00	0.000	180.00	188.67	0.794
2.00	202.00	0.000	191.00	176.33	0.794
2.50	192.00	0.000	207.00	157.00	0.794
3.00	183.00	0.000	220.00	141.00	0.794
4.00	166.00	0.000	234.00	121.33	0.794
5.00	153.00	0.000	242.00	109.00	0.794
6.00	143.00	0.000	248.00	99.67	0.794
7.00	136.00	0.000	253.00	92.33	0.794
8.00	129.00	0.000	256.00	87.00	0.794
9.00	125.00	0.000	258.00	83.67	0.794
10.00	114.00	0.000	260.00	78.00	0.794
11.00	110.00	0.000	262.00	74.67	0.794
12.00	108.00	0.000	263.00	73.00	0.794
13.00	103.00	0.000	264.00	70.33	0.794
14.00	101.00	0.000	264.00	69.67	0.794
15.00	99.00	0.000	265.00	68.00	0.794
16.00	97.00	0.000	266.00	66.33	0.794
17.00	95.00	0.000	266.00	65.67	0.794
18.00	93.00	0.000	267.00	64.00	0.794
19.00	91.00	0.000	267.00	63.33	0.794
20.00	92.00	0.000	267.00	63.67	0.794
21.00	90.00	0.000	267.00	63.00	0.794
22.00	90.00	0.000	267.00	63.00	0.794
23.00	90.00	0.000	267.00	63.00	0.794
24.00	90.00	0.000	267.00	63.00	0.794
25.00	90.00	0.000	267.00	63.00	0.794

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
 Descripción: Relave cicloneado grueso
 Código: Te-AR-2024-M1
 SUCS: SP
 LL, LP, IP: NP, NP, NP
 Elaborado: Ríos, Anibal
 Año: 2021

Densidad: 1.34 g/cm³
 Humedad: 5%
 Gs: 2.96
 σ'_c : 400 kPa
 Parámetro B: 0.96

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.00	0.000	0.00	400.00	0.762
0.05	52.00	0.000	2.00	415.33	0.762
0.10	82.00	0.000	5.00	422.33	0.762
0.15	100.00	0.000	9.00	424.33	0.762
0.20	121.00	0.000	13.00	427.33	0.762
0.25	134.00	0.000	17.00	427.67	0.762
0.35	161.00	0.000	26.00	427.67	0.762
0.50	197.00	0.000	41.00	424.67	0.762
0.75	245.00	0.000	66.00	415.67	0.762
1.00	280.00	0.000	91.00	402.33	0.762
1.25	304.00	0.000	115.00	386.33	0.762
1.50	324.00	0.000	139.00	369.00	0.762
1.75	332.00	0.000	160.00	350.67	0.762
2.00	337.00	0.000	179.00	333.33	0.762
2.50	338.00	0.000	212.00	300.67	0.762
3.00	328.00	0.000	239.00	270.33	0.762
4.00	304.00	0.000	270.00	231.33	0.762
5.00	280.00	0.000	290.00	203.33	0.762
6.00	260.00	0.000	302.00	184.67	0.762
7.00	246.00	0.000	311.00	171.00	0.762
8.00	235.00	0.000	317.00	161.33	0.762
9.00	224.00	0.000	322.00	152.67	0.762
10.00	216.00	0.000	326.00	146.00	0.762
11.00	211.00	0.000	328.00	142.33	0.762
12.00	209.00	0.000	330.00	139.67	0.762
13.00	204.00	0.000	332.00	136.00	0.762
14.00	202.00	0.000	333.00	134.33	0.762
15.00	191.00	0.000	334.00	129.67	0.762
16.00	188.00	0.000	334.00	128.67	0.762
17.00	188.00	0.000	335.00	127.67	0.762
18.00	187.00	0.000	335.00	127.33	0.762
19.00	187.00	0.000	335.00	127.33	0.762
20.00	186.00	0.000	335.00	127.00	0.762
21.00	185.00	0.000	335.00	126.67	0.762
22.00	184.00	0.000	335.00	126.33	0.762
23.00	183.00	0.000	334.00	127.00	0.762
24.00	182.00	0.000	334.00	126.67	0.762
25.00	181.00	0.000	334.00	126.33	0.762

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M2
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.70 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.29
 σ'_c : 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	2.67	0.000	0.00	210.89	0.506
0.04	23.56	0.003	0.00	217.85	0.506
0.09	24.2	0.002	0.00	218.07	0.506
0.19	100.81	-0.036	0.00	243.60	0.505
0.27	118.14	-0.099	0.00	249.38	0.504
0.48	143.95	-0.28	0.00	257.98	0.501
0.75	168.63	-0.504	0.00	266.21	0.498
0.99	187.33	-0.679	0.00	272.44	0.495
1.23	202.05	-0.869	0.00	277.35	0.493
1.42	218.69	-1.025	0.00	282.90	0.490
1.66	233.95	-1.19	0.00	287.98	0.488
1.98	253.95	-1.416	0.00	294.65	0.484
2.41	277.43	-1.709	0.00	302.48	0.480
2.95	308.62	-2.053	0.00	312.87	0.475
3.49	337.71	-2.364	0.00	322.57	0.470
3.92	358.17	-2.603	0.00	329.39	0.466
4.46	382.51	-2.881	0.00	337.50	0.462
5.21	414.6	-3.243	0.00	348.20	0.457
6.24	452.22	-3.681	0.00	360.74	0.450
7.05	478.86	-3.99	0.00	369.62	0.446
8.13	511.96	-4.349	0.00	380.65	0.440
9.20	539.17	-4.66	0.00	389.72	0.435
10.01	556.49	-4.862	0.00	395.50	0.432
12.18	598.16	-5.301	0.00	409.39	0.426
14.06	621.43	-5.587	0.00	417.14	0.422
16.22	626.12	-5.783	0.00	418.71	0.419
18.12	651.18	-5.952	0.00	427.06	0.416
20.02	637.25	-6.021	0.00	422.42	0.415

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M2
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.90 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.29
 σ'_c : 400 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	10.06	0.000	0.00	404.35	0.474
0.03	63.64	-0.006	0.00	422.21	0.474
0.09	136.5	-0.032	0.00	446.50	0.474
0.19	169.7	-0.073	0.00	457.57	0.473
0.30	201.57	-0.145	0.00	468.19	0.472
0.49	245.93	-0.204	0.00	482.98	0.471
0.75	287.33	-0.386	0.00	496.78	0.468
0.98	319.46	-0.554	0.00	507.49	0.466
1.18	346.61	-0.701	0.00	516.54	0.464
1.49	386.29	-0.918	0.00	529.76	0.461
1.69	409.37	-1.064	0.00	537.46	0.458
2.00	443.67	-1.267	0.00	548.89	0.455
2.43	492.09	-1.527	0.00	565.03	0.452
2.96	546.48	-1.834	0.00	583.16	0.447
3.46	597.06	-2.114	0.00	600.02	0.443
3.99	642.19	-2.371	0.00	615.06	0.439
4.50	683.86	-2.62	0.00	628.95	0.435
5.14	729.34	-2.892	0.00	644.11	0.431
6.19	792.87	-3.304	0.00	665.29	0.425
7.22	845.88	-3.658	0.00	682.96	0.420
8.01	880.09	-3.891	0.00	694.36	0.417
9.04	918.65	-4.169	0.00	707.22	0.413
10.09	955.86	-4.426	0.00	719.62	0.409
12.17	1011.55	-4.825	0.00	738.18	0.403
14.24	1051.66	-5.123	0.00	751.55	0.399
16.09	1074.51	-5.316	0.00	759.17	0.396
18.17	1091.25	-5.476	0.00	764.75	0.393
20.02	1095.89	-5.569	0.00	766.30	0.392

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M2
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 2.10 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.29
 σ'_c : 1 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	36.29	0.000	0.00	1211.10	0.402
0.05	120.8	-0.007	0.00	1239.27	0.402
0.10	249.97	-0.017	0.00	1282.32	0.402
0.18	411.9	-0.046	0.00	1336.30	0.402
0.29	541.1	-0.099	0.00	1379.37	0.401
0.49	721.39	-0.236	0.00	1439.46	0.399
0.73	886.58	-0.388	0.00	1494.53	0.397
0.99	1047.45	-0.57	0.00	1548.15	0.394
1.17	1153.68	-0.69	0.00	1583.56	0.393
1.49	1319.71	-0.895	0.00	1638.90	0.390
1.69	1424.87	-1.028	0.00	1673.96	0.388
2.00	1571.37	-1.224	0.00	1722.79	0.385
2.42	1754.88	-1.466	0.00	1783.96	0.382
2.94	1962.82	-1.745	0.00	1853.27	0.378
3.46	2146.35	-2.009	0.00	1914.45	0.374
3.98	2308.32	-2.245	0.00	1968.44	0.371
4.50	2451.23	-2.465	0.00	2016.08	0.368
5.23	2624.92	-2.746	0.00	2073.97	0.364
6.00	2780.4	-3.009	0.00	2125.80	0.360
7.30	2977.94	-3.381	0.00	2191.65	0.355
8.08	3069.94	-3.571	0.00	2222.31	0.352
9.12	3169.1	-3.788	0.00	2255.37	0.349
10.16	3241.59	-3.973	0.00	2279.53	0.347
12.23	3339.56	-4.273	0.00	2312.19	0.342
14.05	3381.75	-4.474	0.00	2326.25	0.340
16.12	3404.93	-4.652	0.00	2333.98	0.337
18.20	3400.24	-4.787	0.00	2332.41	0.335
20.01	3319.39	-4.879	0.00	2305.46	0.334

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M2
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.70 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.29
 σ'_c : 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.24	0.000	0.00	203.08	0.521
0.03	33.88	0.000	2.37	211.92	0.521
0.09	54.68	0.000	9.76	211.47	0.521
0.20	77.41	0.000	25.72	203.08	0.521
0.30	92.57	0.000	42.04	191.82	0.521
0.50	106.45	0.000	68.13	170.35	0.521
0.74	111.52	0.000	93.82	146.35	0.521
0.99	109.08	0.000	114.23	125.13	0.521
1.20	105.58	0.000	126.95	111.24	0.521
1.42	100.87	0.000	136.89	99.73	0.521
1.74	93.21	0.000	148.04	86.03	0.521
1.96	88.05	0.000	153.80	78.55	0.521
2.50	76.40	0.000	164.17	64.30	0.521
2.93	68.05	0.000	170.09	55.59	0.521
3.47	58.93	0.000	175.39	47.25	0.521
3.90	53.17	0.000	178.80	41.92	0.521
4.44	47.89	0.000	181.71	37.25	0.521
5.20	40.55	0.000	185.06	31.46	0.521
6.22	35.29	0.000	187.98	26.78	0.521
7.30	30.41	0.000	190.23	22.91	0.521
8.11	26.35	0.000	191.60	20.18	0.521
9.19	24.21	0.000	193.02	18.05	0.521
10.27	22.69	0.000	194.25	16.31	0.521
12.16	17.68	0.000	195.81	13.08	0.521
14.05	14.93	0.000	196.82	11.16	0.521
16.26	12.02	0.000	198.14	8.87	0.521
18.15	8.83	0.000	198.92	7.02	0.521
20.07	7.74	0.000	199.38	6.20	0.521

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)

Descripción: Relave convencional

Código: Te-AR-2024-M2

SUCS: ML

LL, LP, IP: NP, NP, NP

Elaborado: Ríos, Anibal

Año: 2019

Densidad: 1.90 g/cm³

Humedad: 10%

Gs: 3.29

 σ'_c : 400 kPa

Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	0.31	0.000	0.00	406.10	0.469
0.05	45.71	0.000	1.74	419.50	0.469
0.10	77.52	0.000	6.11	425.73	0.469
0.18	121.42	0.000	17.79	428.68	0.469
0.29	166.55	0.000	39.60	421.92	0.469
0.50	222.30	0.000	87.53	392.57	0.469
0.74	252.75	0.000	136.19	354.06	0.469
0.98	266.28	0.000	175.45	319.31	0.469
1.17	267.30	0.000	199.22	295.88	0.469
1.48	262.43	0.000	230.01	263.47	0.469
1.69	257.11	0.000	245.11	246.59	0.469
1.91	249.73	0.000	257.35	231.89	0.469
2.43	232.77	0.000	280.09	203.50	0.469
2.96	214.68	0.000	295.74	181.82	0.469
3.49	199.73	0.000	307.43	165.15	0.469
3.91	186.01	0.000	314.84	153.16	0.469
4.44	172.72	0.000	322.56	141.01	0.469
5.18	156.63	0.000	331.08	127.13	0.469
6.08	143.20	0.000	339.07	114.66	0.469
7.13	124.90	0.000	346.32	101.31	0.469
8.19	109.31	0.000	351.92	90.52	0.469
9.24	97.56	0.000	356.40	82.12	0.469
10.30	88.07	0.000	359.74	75.62	0.469
12.15	73.70	0.000	364.03	66.54	0.469
14.14	65.48	0.000	367.25	60.58	0.469
16.25	62.22	0.000	369.42	57.32	0.469
18.10	51.95	0.000	371.30	52.02	0.469
20.21	47.96	0.000	372.96	49.03	0.469

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M2
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 2.10 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.29
 σ'_c : 1 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	3.09	0.000	0.00	1204.03	0.398
0.05	6.76	0.000	0.00	1205.25	0.398
0.10	66.01	0.000	1.59	1223.41	0.398
0.18	161.57	0.000	6.44	1250.42	0.398
0.29	285.57	0.000	17.04	1281.15	0.398
0.50	498.38	0.000	52.65	1316.48	0.398
0.73	685.62	0.000	109.13	1322.41	0.398
0.99	857.25	0.000	187.43	1301.32	0.398
1.25	998.13	0.000	275.27	1260.44	0.398
1.46	1088.18	0.000	347.50	1218.23	0.398
1.67	1152.76	0.000	415.99	1171.26	0.398
1.98	1212.80	0.000	506.35	1100.92	0.398
2.50	1247.13	0.000	611.94	1006.77	0.398
2.92	1249.86	0.000	663.86	955.76	0.398
3.44	1246.84	0.000	704.65	913.96	0.398
3.96	1237.32	0.000	728.56	886.88	0.398
4.48	1226.61	0.000	747.46	864.41	0.398
5.21	1208.12	0.000	764.07	841.64	0.398
5.99	1182.72	0.000	778.01	819.23	0.398
7.29	1144.35	0.000	794.45	790.00	0.398
8.07	1114.98	0.000	804.74	769.92	0.398
9.11	1079.86	0.000	816.54	746.41	0.398
10.15	1048.62	0.000	825.53	727.01	0.398
12.22	993.84	0.000	841.50	692.78	0.398
14.04	954.75	0.000	850.85	670.40	0.398
16.12	913.20	0.000	861.35	646.05	0.398
18.20	878.89	0.000	871.36	624.60	0.398
20.02	848.51	0.000	877.59	608.25	0.398

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M3
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.81 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.20
 σ'_c : 600 kPa
Parámetro B: 0.99

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	6.43	0.000	0.00	590.09	0.541
0.04	12.40	-0.020	0.00	592.08	0.541
0.09	81.38	-0.041	0.00	615.07	0.540
0.20	175.87	-0.122	0.00	646.57	0.539
0.30	223.88	-0.183	0.00	662.57	0.538
0.49	284.11	-0.386	0.00	682.65	0.535
0.75	353.53	-0.529	0.00	705.79	0.533
0.99	409.03	-0.712	0.00	724.29	0.530
1.18	448.52	-0.915	0.00	737.45	0.527
1.49	514.73	-1.098	0.00	759.52	0.524
1.70	553.04	-1.301	0.00	772.29	0.521
1.91	594.47	-1.444	0.00	786.10	0.519
2.43	688.59	-1.769	0.00	817.48	0.514
2.96	770.65	-2.084	0.00	844.83	0.509
3.48	850.50	-2.409	0.00	871.45	0.504
4.00	924.54	-2.623	0.00	896.13	0.500
4.42	975.86	-2.887	0.00	913.23	0.496
5.16	1062.41	-3.121	0.00	942.08	0.493
6.05	1158.94	-3.578	0.00	974.26	0.486
7.09	1256.21	-3.944	0.00	1006.68	0.480
8.14	1334.98	-4.270	0.00	1032.94	0.475
9.19	1404.18	-4.554	0.00	1056.00	0.471
10.23	1467.24	-4.859	0.00	1077.03	0.466
12.06	1556.12	-5.246	0.00	1106.65	0.460
14.15	1617.59	-5.551	0.00	1127.14	0.455
16.24	1658.27	-5.754	0.00	1140.70	0.452
18.07	1674.88	-5.906	0.00	1146.24	0.450
20.17	1669.45	-6.079	0.00	1144.43	0.447

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)

Descripción: Relave convencional

Código: Te-AR-2024-M3

SUCS: ML

LL, LP, IP: NP, NP, NP

Elaborado: Ríos, Anibal

Año: 2019

Densidad: 2.21 g/cm³

Humedad: 10%

Gs: 3.20

 σ'_c : 900 kPa

Parámetro B: 0.99

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	13.40	0.000	0.00	904.95	0.469
0.05	70.97	-0.004	0.00	924.14	0.469
0.09	109.70	-0.010	0.00	937.05	0.469
0.18	257.76	-0.044	0.00	986.40	0.468
0.28	413.94	-0.104	0.00	1038.46	0.467
0.49	658.12	-0.237	0.00	1119.86	0.465
0.73	867.21	-0.380	0.00	1189.55	0.463
0.99	1070.20	-0.535	0.00	1257.22	0.461
1.19	1205.55	-0.640	0.00	1302.33	0.459
1.47	1390.74	-0.796	0.00	1364.07	0.457
1.66	1502.83	-0.891	0.00	1401.43	0.456
1.97	1659.64	-1.023	0.00	1453.70	0.454
2.45	1885.50	-1.228	0.00	1528.99	0.451
2.94	2077.95	-1.406	0.00	1593.13	0.448
3.43	2238.41	-1.564	0.00	1646.62	0.446
3.92	2372.81	-1.701	0.00	1691.42	0.444
4.44	2479.77	-1.817	0.00	1727.08	0.442
5.09	2593.72	-1.945	0.00	1765.06	0.440
6.08	2709.80	-2.090	0.00	1803.75	0.438
7.08	2772.56	-2.188	0.00	1824.67	0.437
8.08	2789.79	-2.254	0.00	1830.42	0.436
9.10	2778.77	-2.293	0.00	1826.74	0.435
10.10	2750.38	-2.327	0.00	1817.28	0.435
12.11	2699.36	-2.392	0.00	1800.27	0.434
14.13	2669.56	-2.452	0.00	1790.34	0.433
16.15	2649.38	-2.515	0.00	1783.61	0.432
18.18	2627.41	-2.576	0.00	1776.29	0.431
19.92	2605.51	-2.629	0.00	1768.99	0.430

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M3
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.60 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.20
 σ'_c : 300 kPa
Parámetro B: 0.99

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	7.26	0.000	0.00	303.46	0.572
0.05	45.24	0.000	3.42	312.70	0.572
0.11	65.42	0.000	11.54	311.31	0.572
0.22	95.96	0.000	28.73	304.30	0.572
0.30	113.71	0.000	42.68	296.26	0.572
0.51	152.74	0.000	81.29	270.66	0.572
0.76	171.66	0.000	119.19	239.07	0.572
1.00	178.16	0.000	150.59	209.84	0.572
1.19	175.96	0.000	169.40	190.30	0.572
1.51	170.33	0.000	193.81	164.01	0.572
1.73	163.68	0.000	205.92	149.68	0.572
2.05	154.30	0.000	219.73	132.74	0.572
2.59	139.02	0.000	235.87	111.52	0.572
3.02	127.95	0.000	244.95	98.74	0.572
3.56	117.00	0.000	253.48	86.57	0.572
4.10	108.61	0.000	259.64	77.61	0.572
4.54	102.12	0.000	263.65	71.44	0.572
5.08	95.32	0.000	267.58	65.23	0.572
6.21	86.30	0.000	273.63	56.18	0.572
7.02	80.49	0.000	276.86	51.01	0.572
8.06	71.23	0.000	279.36	45.42	0.572
9.14	66.74	0.000	281.98	41.31	0.572
10.21	62.25	0.000	284.10	37.70	0.572
12.15	58.73	0.000	286.49	34.13	0.572
14.04	54.88	0.000	288.33	31.01	0.572
16.19	50.66	0.000	290.18	27.74	0.572
18.08	45.68	0.000	291.49	24.78	0.572
20.23	44.59	0.000	292.73	23.17	0.572

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M3
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.81 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 3.20
 σ'_c : 600 kPa
Parámetro B: 1.00

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	4.41	0.000	0.00	604.53	0.526
0.05	94.05	0.000	6.28	628.14	0.526
0.10	156.62	0.000	17.61	637.66	0.526
0.21	222.15	0.000	45.18	631.94	0.526
0.32	269.64	0.000	74.13	618.81	0.526
0.50	333.52	0.000	128.24	585.99	0.526
0.74	382.78	0.000	194.11	536.54	0.526
1.00	411.99	0.000	257.87	482.52	0.526
1.26	417.80	0.000	308.45	433.88	0.526
1.58	412.76	0.000	355.22	385.43	0.526
1.79	403.46	0.000	378.94	358.60	0.526
2.00	395.13	0.000	397.80	336.97	0.526
2.52	370.31	0.000	432.16	294.34	0.526
3.05	345.97	0.000	455.15	263.23	0.526
3.57	322.97	0.000	472.78	237.94	0.526
4.10	303.77	0.000	485.56	218.76	0.526
4.52	289.16	0.000	494.15	205.30	0.526
5.04	274.42	0.000	503.07	191.46	0.526
6.04	248.29	0.000	515.92	169.91	0.526
7.09	227.66	0.000	526.01	152.94	0.526
8.14	209.39	0.000	533.71	139.15	0.526
9.19	193.89	0.000	539.95	127.74	0.526
10.24	181.58	0.000	544.91	118.68	0.526
12.07	163.42	0.000	551.25	106.29	0.526
14.22	149.50	0.000	556.36	96.53	0.526
16.14	133.16	0.000	561.61	85.85	0.526
18.24	120.40	0.000	565.59	77.61	0.526
20.07	110.60	0.000	568.01	71.93	0.526

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.55 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 400 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	16.42	0.00	0.00	412.01	0.592
0.05	32.45	0.00	0.00	417.35	0.592
0.07	57.80	0.00	0.00	425.80	0.592
0.20	129.47	-0.07	0.00	449.69	0.591
0.30	162.88	-0.13	0.00	460.83	0.590
0.49	209.19	-0.29	0.00	476.27	0.588
0.74	255.89	-0.48	0.00	491.83	0.585
0.99	288.62	-0.60	0.00	502.74	0.583
1.24	341.29	-0.79	0.00	520.30	0.580
1.44	373.75	-0.95	0.00	531.12	0.577
1.64	406.68	-1.10	0.00	542.09	0.575
1.95	450.31	-1.31	0.00	556.64	0.571
2.46	518.58	-1.65	0.00	579.39	0.566
2.97	582.99	-1.97	0.00	600.87	0.561
3.48	636.68	-2.26	0.00	618.76	0.556
4.00	687.27	-2.53	0.00	635.63	0.552
4.49	731.53	-2.79	0.00	650.38	0.548
5.11	780.85	-3.07	0.00	666.82	0.543
6.14	852.27	-3.50	0.00	690.62	0.536
7.17	912.51	-3.87	0.00	710.71	0.531
8.18	960.23	-4.19	0.00	726.61	0.525
9.22	1000.94	-4.47	0.00	740.18	0.521
10.23	1037.04	-4.72	0.00	752.22	0.517
12.03	1088.99	-5.08	0.00	769.53	0.511
14.09	1120.09	-5.39	0.00	779.90	0.506
16.13	1147.03	-5.62	0.00	788.88	0.503
18.19	1156.45	-5.80	0.00	792.02	0.500
20.25	1161.92	-5.93	0.00	793.84	0.498

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.70 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 600 kPa
Parámetro B: 0.97

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	23.49	0.000	0.00	610.59	0.533
0.05	94.51	-0.010	0.00	634.27	0.533
0.10	135.65	-0.033	0.00	647.98	0.533
0.20	193.73	-0.092	0.00	667.34	0.532
0.28	228.51	-0.143	0.00	678.93	0.531
0.48	306.00	-0.283	0.00	704.76	0.529
0.74	387.35	-0.466	0.00	731.88	0.526
1.00	462.17	-0.643	0.00	756.82	0.523
1.25	531.00	-0.820	0.00	779.76	0.520
1.46	581.97	-0.959	0.00	796.75	0.518
1.66	632.00	-1.089	0.00	813.43	0.516
1.96	702.96	-1.280	0.00	837.08	0.513
2.47	811.54	-1.582	0.00	873.28	0.509
2.98	906.72	-1.867	0.00	905.00	0.504
3.49	995.24	-2.126	0.00	934.51	0.500
4.00	1071.22	-2.368	0.00	959.84	0.497
4.41	1129.32	-2.548	0.00	979.20	0.494
5.12	1212.64	-2.834	0.00	1006.97	0.490
6.14	1314.93	-3.193	0.00	1041.07	0.484
7.15	1398.59	-3.508	0.00	1068.96	0.479
8.17	1468.90	-3.773	0.00	1092.40	0.475
9.18	1524.03	-4.000	0.00	1110.77	0.472
10.20	1566.44	-4.197	0.00	1124.91	0.469
12.23	1636.20	-4.506	0.00	1148.16	0.464
14.01	1678.53	-4.701	0.00	1162.27	0.461
16.30	1701.89	-4.874	0.00	1170.06	0.458
18.08	1704.79	-4.960	0.00	1171.03	0.457
20.11	1681.20	-5.020	0.00	1163.16	0.456

Ensayo: Triaxial Drenado (CID)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.65 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 1 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	54.69	0.000	0.00	1217.13	0.506
0.04	71.94	0.000	0.00	1222.88	0.506
0.09	192.03	-0.013	0.00	1262.92	0.506
0.17	349.83	-0.056	0.00	1315.51	0.505
0.29	482.35	-0.127	0.00	1359.69	0.504
0.50	642.58	-0.284	0.00	1413.10	0.502
0.74	794.84	-0.465	0.00	1463.85	0.499
0.94	905.66	-0.614	0.00	1500.79	0.497
1.23	1061.67	-0.835	0.00	1552.79	0.494
1.42	1157.82	-0.979	0.00	1584.84	0.491
1.73	1297.43	-1.190	0.00	1631.38	0.488
1.90	1382.51	-1.327	0.00	1659.74	0.486
2.42	1587.28	-1.658	0.00	1728.00	0.481
2.92	1769.68	-1.973	0.00	1788.80	0.477
3.42	1932.03	-2.269	0.00	1842.91	0.472
3.92	2077.75	-2.539	0.00	1891.49	0.468
4.41	2210.40	-2.797	0.00	1935.71	0.464
5.18	2380.69	-3.154	0.00	1992.47	0.459
6.19	2572.27	-3.575	0.00	2056.33	0.452
7.20	2724.26	-3.947	0.00	2106.99	0.447
8.22	2852.81	-4.273	0.00	2149.84	0.442
9.23	2955.35	-4.560	0.00	2184.02	0.438
10.25	3043.20	-4.814	0.00	2213.30	0.434
12.15	3166.64	-5.314	0.00	2254.45	0.426
14.18	3259.59	-5.615	0.00	2285.44	0.422
16.21	3308.64	-5.875	0.00	2301.78	0.418
18.25	3318.03	-6.068	0.00	2304.91	0.415
20.13	3268.83	-6.199	0.00	2288.51	0.413

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.55 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	4.50	0.000	0.00	198.36	0.628
0.05	23.01	0.000	3.69	200.84	0.628
0.10	46.12	0.000	9.77	202.46	0.628
0.18	66.96	0.000	20.31	198.86	0.628
0.29	84.58	0.000	33.35	191.70	0.628
0.50	105.53	0.000	70.89	161.14	0.628
0.74	114.03	0.000	94.71	140.16	0.628
1.00	115.79	0.000	112.30	123.15	0.628
1.16	115.55	0.000	120.01	115.37	0.628
1.47	112.19	0.000	131.53	102.73	0.628
1.68	109.50	0.000	137.46	95.89	0.628
1.99	105.05	0.000	144.13	87.74	0.628
2.41	99.78	0.000	150.90	79.22	0.628
2.93	91.47	0.000	156.99	70.35	0.628
3.45	84.54	0.000	161.53	63.51	0.628
3.98	78.75	0.000	165.27	57.84	0.628
4.50	72.81	0.000	168.29	52.84	0.628
5.23	62.72	0.000	172.42	45.35	0.628
6.01	57.97	0.000	175.31	40.87	0.628
7.22	50.75	0.000	178.17	35.61	0.628
8.01	47.34	0.000	179.64	32.99	0.628
9.05	43.25	0.000	181.17	30.10	0.628
10.09	40.02	0.000	182.46	27.74	0.628
12.18	35.04	0.000	184.54	23.99	0.628
14.00	32.38	0.000	186.28	21.37	0.628
16.09	27.79	0.000	187.41	18.71	0.628
18.13	24.64	0.000	188.47	16.60	0.628
20.21	22.63	0.000	189.55	14.85	0.628

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Ríos, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.55 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 400 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	3.23	0.000	0.00	404.80	0.582
0.05	40.47	0.000	2.02	415.19	0.582
0.10	62.56	0.000	8.69	415.88	0.582
0.18	91.73	0.000	20.52	413.77	0.582
0.28	126.74	0.000	39.50	406.46	0.582
0.49	183.09	0.000	82.76	381.99	0.582
0.75	231.44	0.000	135.54	345.32	0.582
0.99	257.39	0.000	176.72	312.79	0.582
1.25	269.52	0.000	211.59	281.97	0.582
1.46	272.75	0.000	233.03	261.61	0.582
1.66	270.89	0.000	249.50	244.51	0.582
1.97	266.39	0.000	267.91	224.61	0.582
2.49	254.32	0.000	288.50	199.99	0.582
3.00	241.40	0.000	302.07	182.11	0.582
3.42	231.38	0.000	310.11	170.73	0.582
3.94	219.34	0.000	318.40	158.43	0.582
4.45	207.06	0.000	325.02	147.72	0.582
5.18	193.06	0.000	332.65	135.42	0.582
6.21	177.50	0.000	340.26	122.62	0.582
7.24	162.75	0.000	346.04	111.93	0.582
8.01	153.58	0.000	349.72	105.19	0.582
9.05	143.06	0.000	353.79	97.61	0.582
10.08	133.56	0.000	357.08	91.16	0.582
12.22	121.36	0.000	361.26	82.91	0.582
14.02	110.89	0.000	364.53	76.15	0.582
16.09	100.15	0.000	367.57	69.53	0.582
18.00	88.53	0.000	370.93	62.30	0.582
20.06	78.15	0.000	373.94	55.83	0.582

Ensayo: Triaxial No Drenado (CIU)
Descripción: Relave convencional
Código: Te-AR-2024-M4
SUCS: ML
LL, LP, IP: NP, NP, NP
Elaborado: Rios, Anibal
Año: 2019

Densidad: 1.65 g/cm³
Humedad: 10%
Gs: 2.68
 σ'_c : 1 200 kPa
Parámetro B: 0.98

ε_1 (%)	q (kPa)	ε_v (%)	u (kPa)	p' (kPa)	e (adm)
0.00	3.50	0.000	0.00	1204.12	0.501
0.05	7.22	0.000	0.15	1205.21	0.501
0.10	30.30	0.000	2.17	1210.88	0.501
0.18	112.60	0.000	18.51	1221.98	0.501
0.28	253.67	0.000	61.47	1226.04	0.501
0.49	507.59	0.000	185.59	1186.56	0.501
0.75	725.05	0.000	352.20	1092.43	0.501
0.98	848.02	0.000	483.74	1001.88	0.501
1.24	920.72	0.000	591.54	918.31	0.501
1.44	952.05	0.000	652.48	867.83	0.501
1.75	973.97	0.000	713.84	813.76	0.501
1.96	983.69	0.000	744.54	786.31	0.501
2.47	989.86	0.000	787.32	745.59	0.501
2.99	991.84	0.000	812.64	720.93	0.501
3.50	991.96	0.000	829.70	703.90	0.501
3.91	991.63	0.000	838.04	695.45	0.501
4.43	991.50	0.000	846.13	687.33	0.501
5.15	988.26	0.000	854.38	677.99	0.501
6.18	983.16	0.000	859.55	671.12	0.501
7.20	973.82	0.000	863.54	664.02	0.501
8.23	961.15	0.000	867.23	656.11	0.501
9.00	947.61	0.000	869.34	649.48	0.501
10.29	921.54	0.000	873.15	636.98	0.501
12.08	883.41	0.000	880.60	616.82	0.501
14.14	854.59	0.000	890.63	597.19	0.501
16.19	826.72	0.000	894.19	584.34	0.501
18.25	798.75	0.000	901.94	567.26	0.501
20.05	767.67	0.000	909.40	549.45	0.501