

**Evaluación del modelo constitutivo Generalized  
Bounding Surface Model en la simulación del  
comportamiento de suelos cohesivos**

por

Ing. Tania Paola Molina Rincón

Asesor

Ing. Andrés Nieto Leal Ph.D.

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Magíster en Ingeniería Civil

Grupo de Investigación en Geotecnia

2019

# Resumen

Conociendo las propiedades mecánicas y el comportamiento esfuerzo - deformación del suelo, se pueden hacer diseños más precisos donde se utilicen modelos constitutivos robustos, los cuales predicen de una mejor manera el comportamiento del suelo para caracterizar el terreno en donde se pretendan construir futuros proyectos y garantizar de esta manera la estabilidad que tendrá la obra civil.

El modelo Generalized Bounding Surface (GBSM) permite predecir computacionalmente el comportamiento de suelos cohesivos tanto isotrópica como anisotrópicamente consolidados, usando la regla de flujo asociada. Es por esto que se busca simular una serie de suelos que permita validar el modelo, surgiendo como interrogante: ¿Cuál es el desempeño del modelo constitutivo Generalized Bounding Surface Model (GBSM) en la simulación del comportamiento de suelos cohesivos bajo cargas monotónicas?

La evaluación de este modelo constitutivo se hizo comprobando la versión isotrópica y anisotrópica con la regla de flujo asociada, en cinco diferentes tipos de suelos. Recopilando datos de las distintas tesis, artículos y fuentes de información que tengan ensayos experimentales, así mismo digitalizar las gráficas obtenidas, y de esta manera se completan los datos base para el uso del programa Calbr8, que permite calibrar los parámetros necesarios para ejecutar las representaciones correspondientes. Los datos obtenidos se procesaron e interpretaron comparando las simulaciones hechas con respecto a los resultados experimentales.

Como resultados finales una vez se culminan las simulaciones en el programa Calbr8 y aplicando el GBSM, se obtuvieron las gráficas de los estados de esfuerzos, deformación axial y presión de poros, para ser comparadas con respecto a las trayectorias experimentales. Comprobando que el modelo GBSM está programado para pronosticar el comportamiento mecánico de cada suelo, implementando la teoría de la superficie limite, según sus parámetros y la calibración de las variables propias de este, los resultados comprueban la aplicación optima de este modelo en la geotecnia.

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.1.1. Objetivo general . . . . .	2
1.1.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.2. Alcance . . . . .	3
<b>2. Elastoplásticidad</b>	<b>4</b>
2.1. Aspectos generales del comportamiento elástico y plástico . . . . .	4
2.1.1. Comportamiento elástico . . . . .	5
2.1.2. Comportamiento plástico . . . . .	5
2.2. Conceptos fundamentales . . . . .	6
2.2.1. Superficie de fluencia . . . . .	7
2.2.2. Regla de flujo . . . . .	7
2.2.3. Regla de endurecimiento . . . . .	8
2.3. Teoría de la Elastoplásticidad . . . . .	8
<b>3. <i>Bounding Surface</i> Elastoplasticity</b>	<b>10</b>
3.1. Antecedentes . . . . .	10
3.2. Concepto de <i>Bounding Surface</i> . . . . .	15
3.3. Modelo constitutivo <i>Generalized Bounding Surface Model</i> . . . . .	17
3.3.1. Invariantes de esfuerzo . . . . .	17
3.3.2. Descomposición de deformaciones . . . . .	19
3.3.3. Definición de variables internas . . . . .	19

3.3.4.	Respuesta elástica . . . . .	19
3.3.5.	Respuesta plástica . . . . .	20
3.3.6.	Ángulo de Lode . . . . .	20
3.3.7.	Criterio de falla . . . . .	21
3.3.8.	Flujo plástico y Forma específica de la superficie de frontera . . . . .	24
3.3.9.	Forma específica de la función de endurecimiento . . . . .	25
3.3.10.	Regla de endurecimiento rotacional . . . . .	26
<b>4.</b>	<b>Metodología</b>	<b>28</b>
<b>5.</b>	<b>Parametrización del modelo constitutivo <i>GBSM</i></b>	<b>42</b>
5.1.	Parámetro de forma $R$ . . . . .	42
5.2.	Parámetro de centro de proyección $C$ . . . . .	45
5.3.	Parámetro de núcleo elástico $s_p$ . . . . .	48
5.4.	Parámetros de endurecimiento plástico $a$ y $h_c, h_e$ . . . . .	52
5.5.	Parámetro de endurecimiento rotacional $\psi_2$ . . . . .	58
<b>6.</b>	<b>Desempeño del modelo <i>GBSM</i></b>	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
7.1.	Recomendaciones para futuras investigaciones . . . . .	73

# Capítulo 1

## Introducción

El comportamiento mecánico que exhiben los suelos cuando son sometidos a procesos de carga ha sido un tema ampliamente estudiado desde hace varias décadas debido a las características particulares de este material. Así, a partir de estos estudios han surgido diversos modelos constitutivos elastoplásticos capaces de representar el comportamiento del suelo bajo condiciones determinadas. Los modelos constitutivos, desde el punto de vista mecánico, se definen como un conjunto de formulaciones matemáticas que relacionan el estado de esfuerzos con la deformación del material y por tanto describen su comportamiento físico. Los modelos constitutivos elastoplásticos que se han desarrollado pueden ser divididos en 4 tipos dependiendo la formulación, estos se enumeran a continuación desde el más simple hasta el más complejo y preciso:

- Isotrópico asociado
- Isotrópico no asociado
- Anisotrópico asociado
- Anisotrópico no asociado

Los términos isotrópico y anisotrópico hacen referencia al comportamiento direccional del material, en donde el término isotrópico hace referencia a un comportamiento idéntico en todas las direcciones posibles y el término anisotrópico a un comportamiento diferencial

dependiendo de la dirección. Por otra parte, teniendo en cuenta los conceptos de la elastoplasticidad, cuando se habla de asociado o no asociado esto denota el tipo de regla de flujo que emplea el modelo y la superficie que emplea para calcular deformaciones plásticas. La regla de flujo asociada emplea como superficie de potencial plástico la misma superficie de fluencia y la no asociada emplea como superficie de potencial plástico una superficie diferente a la superficie de fluencia. Lo anterior se explicará en detalle más adelante dentro de los aspectos teóricos. Uno de los primeros modelos constitutivos que buscaba representar de manera adecuada el comportamiento de suelos cohesivos fue el Modelo Cam Clay Modificado (isotrópico asociado) propuesto por Roscoe and Burland (1968). Este modelo al ser evaluado, mostro tener deficiencias al simular el comportamiento de suelos sobreconsolidados y al incluir las características anisotropicas del material. Teniendo en cuenta lo anterior, se han venido desarrollando diversos modelos elastoplasticos basados en diferentes conceptos, uno de ellos es el modelo para suelos cohesivos *Generalized Bounding Surface Model* (GBSM) propuesto por Nieto-Leal (2016). El GBSM es un modelo elastoplástico basado en el concepto de la superficie de frontera (*bounding surface*) el cual incorpora las características anisotrópicas de los suelos cohesivos y puede emplear una regla de flujo asociada o no asociada. Este modelo, aunque ya ha sido validado en un buen número de arcillas, debe de seguir siendo evaluado en más suelos con el fin de corroborar sus capacidades y encontrar deficiencias con el fin de mejorarlo y/o establecer recomendaciones de uso. Lo anterior, constituye la principal motivación de esta investigación, por tanto, en el trascurso de este trabajo se analizarán y discutirán las capacidades del GBSM en la simulación numérica de suelos cohesivos realizando una parametrización del mismo.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

Evaluar y validar el desempeño de modelo GBSM en la simulación de ensayos triaxiales de corte no drenado en suelos cohesivos consolidados isotrópicamente y anisotrópicamente mediante la comparación entre datos experimentales de ensayos realizados por diferentes

autores y las simulaciones numéricas realizadas con el programa de elementos finitos Calbr8 (Kaliakin, 1992).

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Simular el comportamiento de los suelos cohesivos con el fin de calibrar los parámetros que componen el modelo.
- Realizar un estudio paramétrico del modelo que permita identificar la función que tiene cada uno de los parámetros dentro del modelo.
- Establecer recomendaciones para los valores de cada uno de los parámetros que constituyen el modelo.
- Comparar los resultados de las simulaciones realizadas con los datos experimentales recolectados para validar el uso del modelo GBSM en la simulación del comportamiento mecánico de los suelos cohesivos.

## **1.2. Alcance**

En el presente trabajo se realizará la evaluación del modelo Generalized Bounding Surface utilizando la versión isotrópica y anisotrópica con regla de flujo asociada en cinco diferentes tipos de suelos consolidados isotrópica y anisotrópicamente. La recopilación de datos se hará mediante la búsqueda de las tesis, artículos y todas las fuentes de información que tengan ensayos experimentales, posteriormente digitalizar las gráficas de estos ensayos, recolectar los datos base para el uso del programa Calbr8, calibrando los parámetros necesarios para ejecutar las simulaciones correspondientes a cada suelo y realizar las simulaciones de cada tipo de suelo en este. Los datos obtenidos serán procesados e interpretados mediante el GBSM, comparando las simulaciones realizadas con respecto a los resultados experimentales.

# Capítulo 2

## Elastoplásticidad

La Teoría de la elastoplásticidad está fundamentada en las concepciones básicas de las teorías de comportamiento elástico y plástico a través de una serie de conceptos que se trataran mas adelante. Esta teoría establece una relación matemática entre esfuerzos y deformaciones con la cual es posible calcular las deformaciones en función de los esfuerzos a los que es sometido un material que exhibe características elásticas y plásticas a la vez, como lo es el caso de los suelos.

### 2.1. Aspectos generales del comportamiento elástico y plástico

En la Figura 2.1 se muestra la curva esfuerzo–deformación típica de un suelo. En esta, se evidencia comportamiento elástico y plástico simultáneo del material sujeto a un proceso de carga y descarga.



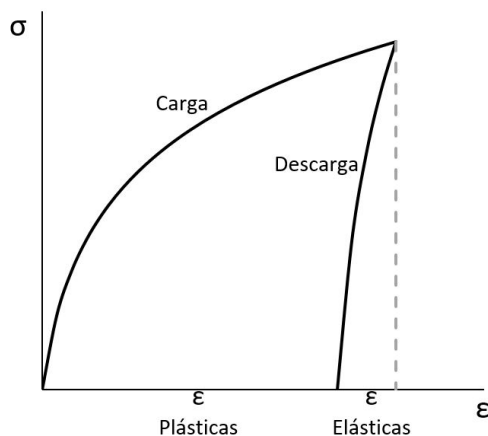


Figura 2.1: Curva esfuerzo–deformación típica de un suelo.

A continuación se explica cada uno de estos dos tipos de comportamientos, elástico y plástico.

### 2.1.1. Comportamiento elástico

La elasticidad en un material hace referencia a la capacidad que tiene éste para deformarse y volver a su estado original luego de retirar el esfuerzo que lo deforme, por tanto, este proceso de deformación es reversible. El análisis de este comportamiento se ha realizado a partir de la Teoría General de la Elasticidad o Ley de Hooke Generalizada, la cual fue desarrollada hacia el año 1675 y en la que se plantea la relación entre esfuerzos y deformaciones elásticas a través de un conjunto de constantes elásticas (en términos tridimensionales) propias de cada material. La Ley de Hooke, de manera estricta, no representa apropiadamente el comportamiento de los suelos debido a que su naturaleza no es elástica lineal ni tampoco isotrópica, sin embargo, algunas veces se ha idealizado este comportamiento en los suelos con el fin de poder estimar deformaciones elásticas asociadas a esfuerzos aplicados dentro de masas de suelos.

### 2.1.2. Comportamiento plástico

La plasticidad en un material hace referencia a las deformaciones no recuperables de este cuando el esfuerzo que lo deforme es retirado, por lo cual este tipo de deformaciones son

denominadas irreversibles. Con el objetivo de estimar estas deformaciones se planteó la Teoría de la Plasticidad, la cual fue desarrollada en un principio para predecir el comportamiento de materiales metálicos cuando excedían su límite elástico y que posteriormente fue extendida a otros materiales que muestran este comportamiento como lo son el concreto, los polímeros y los suelos.

## 2.2. Conceptos fundamentales

La teoría de la elastoplasticidad está basada en los siguientes conceptos: superficie de fluencia, regla de flujo y regla de endurecimiento. A continuación se definen cada uno de estos conceptos, ilustrándolos gráficamente a través de las Figuras 2.2 y 2.3 asociadas al modelo Cam Clay Modificado (*Modified Cam Clay*).

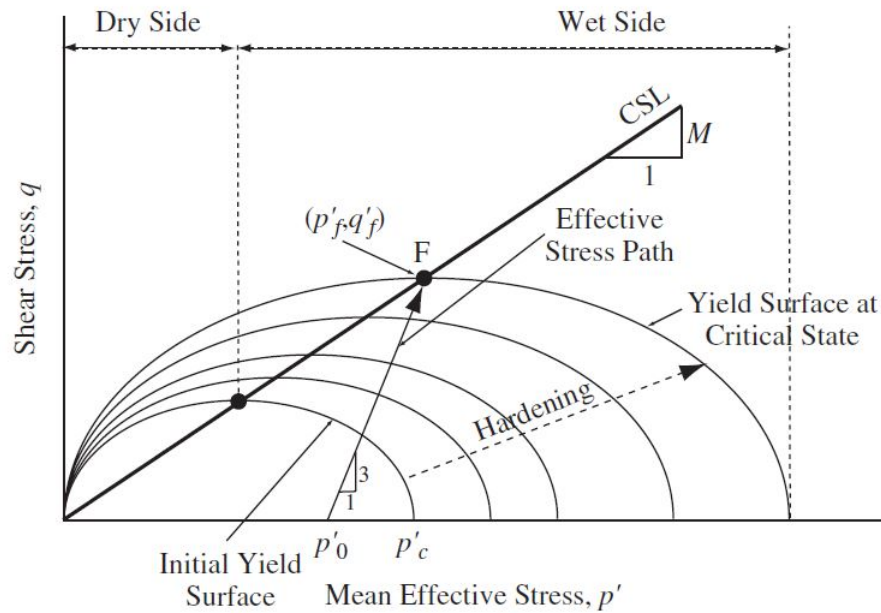


Figura 2.2: Componentes del modelo Cam Clay Modificado ilustrando el comportamiento de endurecimiento. (Helwany, 2007)

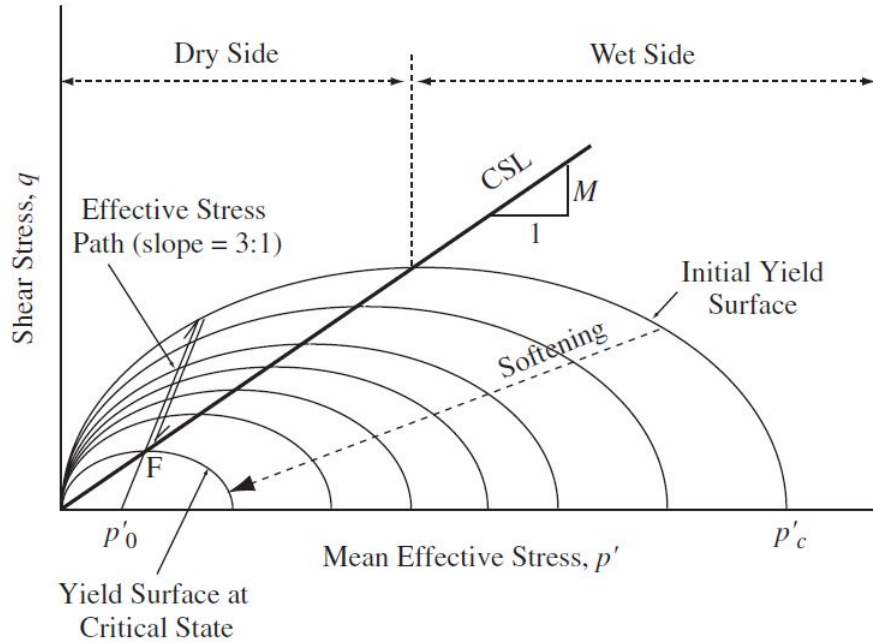


Figura 2.3: Componentes del modelo Cam Clay Modificado ilustrando el comportamiento de ablandamiento. (Helwany, 2007)

### 2.2.1. Superficie de fluencia

La fluencia es un proceso de cambio de rigidez en donde esta comienza a disminuir presentándose cuando el material entra en el rango plástico. La superficie de fluencia (*Yield Surface*) se define como el contorno del dominio elástico representado por una función  $f$  escrita en términos de esfuerzos y que adopta determinada superficie en el espacio de esfuerzos siendo esta totalmente encerrada y convexa. La superficie de fluencia define el inicio de las deformaciones plásticas. En términos clásicos, cuando el estado de esfuerzos en el que se encuentra el material esta sobre o fuera de la superficie de fluencia se producirán deformaciones únicamente plásticas y si el estado de esfuerzos esta dentro de la superficie de fluencia se producirán deformaciones únicamente elásticas. (Nieto-Leal, 2007)

### 2.2.2. Regla de flujo

La regla de flujo (*Flow Rule*) es una relación entre el esfuerzo y las deformaciones plásticas, cortantes y volumétricas, construida bajo la suposición de la independencia de la velo-

cidad y la existencia de una superficie de potencial plástico  $g$ .

La regla de flujo establece la dirección del incremento de deformaciones plásticas siendo este un vector normal a la superficie de potencial plástico  $g$ , por lo cual, la regla de flujo es función del potencial plástico y no de la superficie de fluencia.(Nieto-Leal, 2007)

Existen dos tipos de regla de flujo o condiciones, la primera es la regla de flujo **Asociada** o condición de normalidad en donde el potencial plástico está dado por la misma ecuación de la superficie de fluencia ( $f = g$ )y la segunda es la regla de flujo **No-Asociada** o condición de no normalidad en donde el potencial plástico no está dado por la misma ecuación de la superficie de fluencia ( $f \neq g$ ) y está formulado de manera independiente.(Nieto-Leal, 2016)

### 2.2.3. Regla de endurecimiento

Cuando el estado de esfuerzos del material se encuentra sobre o por fuera de la superficie de fluencia, la superficie de fluencia crece creando un nuevo dominio elástico siendo denominado este proceso endurecimiento. La regla de endurecimiento (*Hardening Rule*) determina el cambio de la superficie de fluencia durante el curso del flujo plástico y el cambio de propiedades en el proceso de endurecimiento/ablandamiento.(Nieto-Leal, 2016)

## 2.3. Teoría de la Elastoplásticidad

Esta teoría, considerando únicamente deformaciones infinitesimales descompone de forma aditiva el tensor de deformaciones totales en dos partes: deformaciones elásticas y plásticas.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^P \quad (2.1)$$

Esta descomposición entre deformaciones plásticas se da gracias a la existencia de una superficie de fluencia convexa y totalmente encerrada que separa las regiones puramente elásticas y plásticas.

Las deformaciones elásticas  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$  pueden ser obtenidas mediante la Ecuación 2.2 dada por la ley de Hooke.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = C_{ijkl} \dot{\sigma}'_{kl} \quad (2.2)$$

Donde  $C_{ijkl}$  es el tensor de cuarto orden de constantes elásticas y  $\sigma'_{kl}$  el tensor de esfuerzos efectivos en el cual el material se encuentra.

Definiendo una superficie de carga  $f^*(\sigma'_{ij}, q_n) = 0$ , las deformaciones plásticas  $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$  pueden ser obtenidas mediante las siguientes ecuaciones.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^P = \langle L \rangle R_{ij} \quad (2.3)$$

$$\dot{q}_n = \langle L \rangle r_n \quad (2.4)$$

Los valores de  $R_{ij}$  y  $r_{ij}$  representan la dirección de los incrementos de  $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$  y  $\dot{q}_n$  respectivamente. Los símbolos  $\langle \rangle$  denotan los corchetes de Macauley, donde  $\langle L \rangle = L$  si  $L > 0$ , y  $\langle L \rangle = 0$  para  $L \leq 0$ ,  $L$  es el índice de carga escalar definido a continuación.

$$L = \frac{1}{K_p} L_{ij} \dot{\sigma}'_{ij} = \frac{1}{K_p} \frac{\partial f^*}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} \quad (2.5)$$

Siendo  $L_{ij} = \partial f^* / \partial \sigma'_{ij}$  el tensor que define la naturaleza del incremento de carga actuando en dirección normal a la superficie de carga. Cuando  $L > 0$ ,  $L = 0$  y  $L < 0$  ocurren incrementos de carga, carga neutra y descarga de manera respectiva.

El valor de  $K_p$  representa el módulo plástico escalar.  $K_p$  es definido por la Ecuación 2.6 a través de la condición de consistencia  $\partial f^* = 0$ , las ecuaciones 2.4 y 2.5 y de asumir  $L > 0$ .

$$K_p = -\frac{\partial f^*}{\partial q_n} r_n \quad (2.6)$$

Su inclusión permite predecir una respuesta (estable) de endurecimiento cuando  $K_p > 0$  y una respuesta (inestable) de ablandamiento cuando  $K_p < 0$ .

El tensor de segundo orden  $R_{ij}$  corresponde al gradiente de una superficie de potencial plástico convexa ( $g = 0$ ) adecuadamente definida.

$$R_{ij} = \frac{\partial g^*}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (2.7)$$

Cuando se emplea una regla de flujo asociada, la Ecuación 2.7 es modificada, en esta se reemplaza la superficie de potencial plástico  $g^*$  por la superficie de carga  $f^*$ . Teniendo en cuenta esto, el tensor de segundo orden  $R_{ij}$  cuando se emplea una regla de flujo asociada es definido como:

$$R_{ij} = \frac{\partial f^*}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (2.8)$$

# Capítulo 3

## *Bounding Surface* Elastoplasticity

### 3.1. Antecedentes

Buscando describir matemáticamente el flujo plástico de materiales metálicos es como nace el concepto de Bounding Surface o Superficie de Frontera por parte de Dafalias and Popov (1975). La superficie de frontera es un concepto elasto-plástico, el cual incorpora un relación matemática denominada regla de mapeo (*mapping rule*) que permite el calculo de deformaciones plásticas para estados de esfuerzos localizados dentro de la superficie de fluencia. Así, el concepto de superficie frontera permite una transición suave del esfuerzo en un estado elástico, dentro y sobre la superficie.

Este concepto es adaptado y formulado en términos de dos invariantes de esfuerzo para representar el comportamiento elasto-plástico de suelos cohesivos consolidados isotrópicamente con mayor precisión en arcillas normalmente consolidadas y sobre-consolidadas (Dafalias and Herrmann, 1980, 1982a), teniendo como objetivo mejorar sus capacidades predictivas en las simulaciones numéricas en comparación con los modelos clásicos de elasto-plasticidad que se tenían en ese entonces. Consecutivamente esta formulación es escrita en términos de tres invariantes de esfuerzo, incluyendo dentro de su estructura la teoría de estado crítico (Dafalias and Herrmann, 1982b; Dafalias et al., 1982).

Tiempo despues, Dafalias and Herrmann (1986) terminan sintetizando sus formulacio-

nes previas en un solo modelo en el que incluyen nuevas características que mejoraban su desempeño en la simulación numérica de suelos cohesivos consolidados isotrópicamente y bajo condiciones de carga monotónica. Esta versión sintetizada de sus modelos en términos generales era bastante compleja, ya que la superficie de frontera que propusieron estaba compuesta por dos elipses diferentes y una hipérbola en el plano de invariantes de esfuerzos  $I$  y  $J$  (Figura 3.1), por lo que su incorporación numérica resultaba bastante dispendiosa.

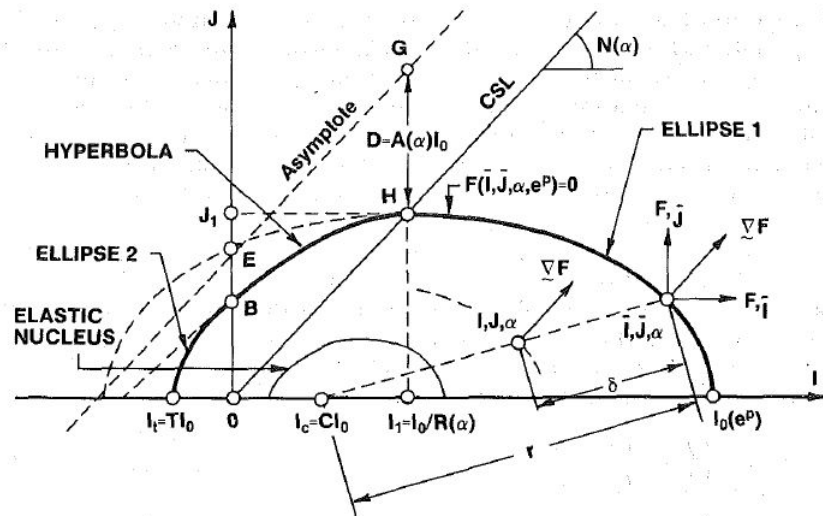


Figura 3.1: Ilustración esquemática de la superficie de frontera y de la regla de mapeo del modelo propuesto por Dafalias and Herrmann (1986)

De esta manera, Kaliakin and Dafalias (1989) crean una versión de este modelo en la que la superficie de frontera compuesta es reformulada y reducida a una superficie simplificada con forma elíptica en el plano de invariantes de esfuerzos  $I$  y  $J$  (Figura 3.2). Esta formulación mostró, con respecto a la anterior, grandes capacidades para predecir el comportamiento isotrópico del suelo sujeto a cargas monotónicas y cíclicas en condiciones drenadas y no drenadas para cualquier OCR.

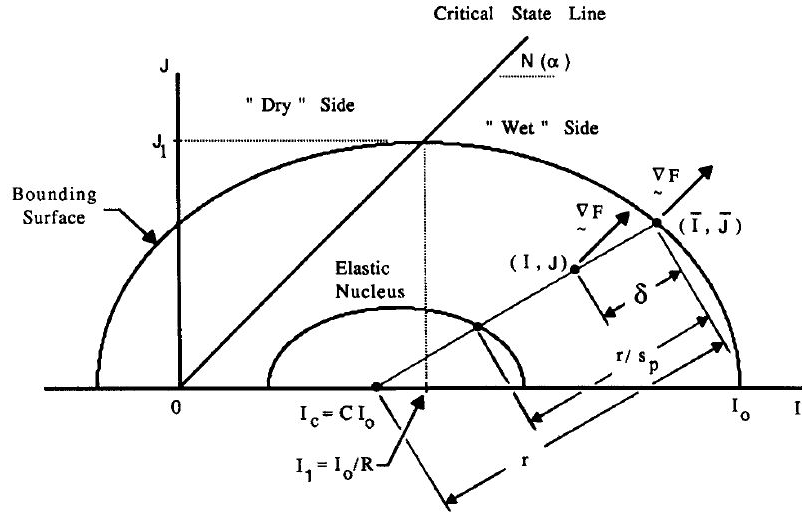


Figura 3.2: Ilustración esquemática de la superficie de frontera y de la regla de mapeo del modelo simplificado propuesto por Kaliakin and Dafalias (1989)

Partiendo de la teoría anisotrópica de estado crítico propuesta por Dafalias (1986), Anandarajah and Dafalias (1986) trabajando sobre el concepto clásico de superficie de frontera (isotrópico) escriben una serie de formulaciones que permitieron representar el comportamiento anisotrópico de los suelos, desarrollando así las reglas de endurecimiento rotacional (rotational hardening) y la forma de endurecimiento (shape-hardening) que permiten al modelo clásico tener en cuenta el estado anisotrópico inicial del material y su evolución en procesos de carga o consolidación.

A comienzos de siglo, Ling et al. (2002) basado en los conceptos de estado crítico y plasticidad de superficie de frontera para estados anisotrópicos desarrolla un nuevo modelo, en el que incorpora además de una regla de endurecimiento isotrópica una regla de endurecimiento rotacional y distorsional con una regla de flujo asociada que permite tener en cuenta condiciones anisotrópicas del material, también se utilizó dentro de este modelo una forma simplificada del módulo plástico permitiendo de esta manera configurar todo el modelo con 12 parámetros. Uno de los problemas más importantes que se encontró para este modelo es que está limitado a suelos que no exhiben un comportamiento de deformación-ablandamiento significativo.



Tiempo después, Jiang et al. (2012) con el fin de simular con mayor exactitud deformaciones tanto por endurecimiento como ablandamiento, extienden las formulaciones previas que utilizaban una regla de flujo asociada a una regla de flujo no asociada formulando una superficie de potencial plástico independiente de la superficie de frontera, de esta manera se obtuvieron resultados más precisos con respecto a la regla de flujo asociada utilizada hasta ese entonces en todas las versiones formuladas por diferentes autores a lo largo del tiempo. Este modelo consta de 11 parámetros asociados al estado crítico y la configuración de superficies de frontera y potencial plástico, por lo que adicionalmente redujo el número de parámetros que requeridos para las simulaciones. Posteriormente, Jiang et al. (2017) incluyen dentro de su formulación 3 parámetros que controlan características visco-plásticas del material, con el objetivo de reproducir comportamientos tiempo—dependientes como *creep*, relajación y cambios en la velocidad de deformación.

Kaliakin and Nieto-Leal (2013) inician la formulación del *Generalized Bounding Surface Model* GBSM, un modelo que incluye todas las versiones previas de los modelos basados en el concepto de superficie de frontera y que puede ser simplificado dependiendo de las necesidades que se tengan a la hora de simular un problema de geotecnia en suelos cohesivos. Adicionalmente en este trabajo se buscaba mejorar las diversas limitaciones o falencias que poseen los modelos planteados, y es por ello que inician la formulación y estructuración de una regla de flujo no asociada (con su respectiva superficie de potencial plástico) y una regla de endurecimiento rotacional para tener en cuenta y recrear el ablandamiento y endurecimiento de los suelos junto con las características anisotrópicas de los mismos. Tiempo después, Nieto-Leal and Kaliakin (2014) desarrollan una función de forma de endurecimiento (*shape—hardening function*) que mejora las capacidades predictivas del modelo que estaba formulando, especialmente para suelos sobre-consolidados.

Finalmente, Nieto-Leal (2016) termina de formular el modelo que buscó desarrollar y llegó a definir un modelo totalmente tridimensional en términos de los invariantes de esfuerzo  $I$ ,  $J$  y  $\theta$ , dependiente del tiempo que tiene en cuenta la anisotropía inherente (o inicial) e inducida por procesos de carga, y que permite simular mejor el comportamiento de los suelos cohesi-

vos que presentan ablandamiento empleando una nueva formulación para las reglas de flujo asociada y no asociada. Adicionalmente, este modelo se puede adaptar desde la forma más simple de simulación, isotrópica con regla de flujo asociada, hasta la forma más compleja, anisotrópica con regla de flujo no asociada Nieto-Leal et al. (2017).

Las ecuaciones constitutivas asociadas al GBSM se han incorporado a un conjunto de subrutinas modulares. La implementación del modelo de esta manera facilita la incorporación simple y económica en programas de elementos finitos nuevos y existentes para el análisis de estructuras de suelo. Con el fin de evaluar las características del suelo modelado y de ajustarlo a las mediciones experimentales, se debe disponer de un medio para predecir los resultados de las pruebas homogéneas simples. El programa Calbr8 (Kaliakin, 1992) se ha escrito para este propósito (Nieto-Leal et al., 2017). Se desarrolla un modelo anisotrópico de superficie de frontera, introduciendo tres parámetros visco-plásticos, siendo validado con ensayos triaxiales no drenados en arcillas isotrópica y anisotrópicamente consolidadas. El modelo permite identificar los esfuerzos cortantes, en las simulaciones y los ensayos experimentales

El GBSM es un modelo constitutivo totalmente tridimensional, dependiente del tiempo, que introduce dentro de su formulación características anisotrópicas inherentes como inducidas por procesos de carga a través de una ley de endurecimiento rotacional (*Rotational Hardening Rule*). Por otra parte, permite simular el ablandamiento de los suelos gracias a la incorporación de una regla de flujo no-asociada. La forma que adquiere la superficie de frontera, la superficie de potencial plástico y la superficie de falla en el espacio de esfuerzos se presenta en la Figura 3.3.

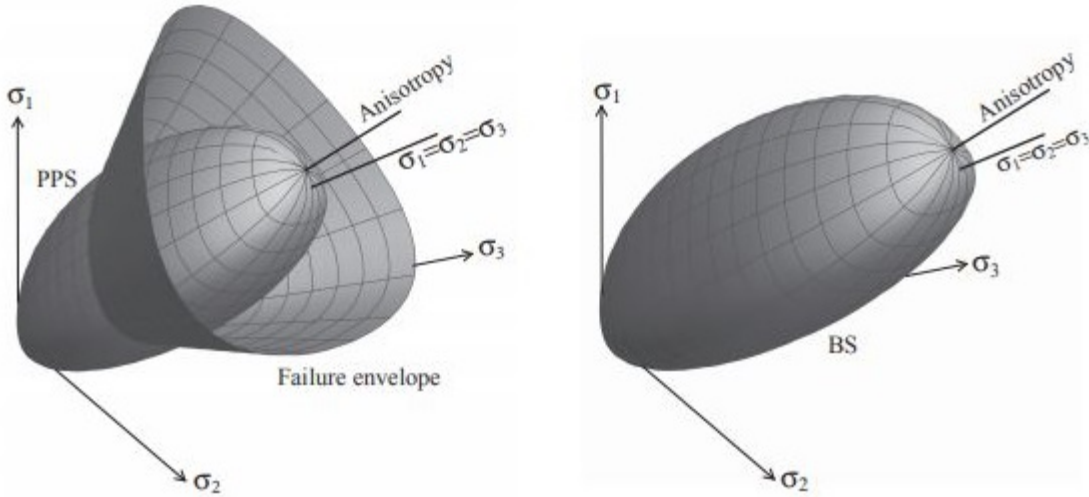


Figura 3.3: GBSM en espacio de esfuerzos: superficie de potencial plástico y la superficie de falla (izquierda), superficie de frontera (derecha). (Nieto-Leal, 2016)

En caso de que todas las características mencionadas del GBSM no se consideren necesarias para la simulación de un problema, éste puede simplificarse adecuadamente de acuerdo a las necesidades del mismo (Nieto-Leal et al., 2017). Si solo se consideran la historia de carga monotónica, el GBSM se reduce a un modelo anisotrópico tiempo-dependiente con una regla de flujo no-asociada, Si el problema no necesita incluir el ablandamiento del material el GBSM se puede simplificar un modelo anisotrópico tiempo-dependiente con una regla de flujo asociada, finalmente, si el problema se restringe a suelos consolidados isotrópicamente, el GBSM puede simplificarse al máximo teniendo así un modelo isotrópico tiempo-dependiente o independiente del tiempo que utiliza una regla de flujo asociada (Nieto-Leal, 2016).

### 3.2. Concepto de *Bounding Surface*

El concepto elastoplástico *Bounding Surface* o superficie de frontera tiene como hipótesis dentro de su concepción que para estados de esfuerzos dentro de la superficie de frontera (superficie homónima a la superficie de fluencia que separa las regiones elásticas y plásticas)

pueden presentarse deformaciones elásticas y plásticas de manera simultanea, diferenciándose así de diversos modelos constitutivos clásicos que establecen que dentro de la superficie de fluencia no existen deformaciones plásticas sino deformaciones elásticas únicamente.

Este concepto surge al observar que en cualquier curva de esfuerzo–deformación de carga monótonica seguida de una descarga, los estados de esfuerzo–deformación convergen a ciertos “*bound’s*” o límites/fronteras bien definidos en el plano esfuerzo–deformación. Este modelo constitutivo describe el estado limite usando una superficie de frontera en el espacio de esfuerzos, la cual, encierra el origen y es de forma convexa permitiendo que cualquier radio que salga del origen intercepta la superficie solo en un punto y sea apropiado al emplearlo para describir el comportamiento de los suelos.

Si el estado del material es definido en términos del tensor de esfuerzos efectivos  $\sigma'_{ij}$  y de un conjunto de variables internas adecuadas  $q_n$ , la superficie de frontera en el espacio de esfuerzos es definida analíticamente por la Ecuación 3.1.

$$F(\bar{\sigma}'_{ij}, q_n) = 0 \quad (3.1)$$

Donde la barra encima del tensor de esfuerzos efectivos indica el valor de un punto “imagen” sobre la superficie de frontera para un estado de esfuerzos  $\sigma'_{ij}$  dentro de la superficie. Para cada estado de esfuerzos  $\sigma'_{ij}$  existe una única “imagen”  $\bar{\sigma}'_{ij}$  asignada mediante una regla de mapeo (Mapping Rule) definida correctamente, que proyecta el estado de esfuerzos sobre la superficie de frontera.

Cuando el estado de esfuerzos se encuentra sobre la superficie de frontera  $\bar{\sigma}'_{ij}$  es exactamente igual al estado de esfuerzos en ese punto  $\sigma'_{ij}$ . Por otra parte, cuando el estado de esfuerzos  $\sigma'_{ij}$  está dentro de la superficie de frontera el valor de  $\bar{\sigma}'_{ij}$  es asignado por la regla de mapeo dada por la Ecuación 3.2.

$$\bar{\sigma}'_{ij} = b(\sigma_{ij} - a_{ij}) + a_{ij} \quad (3.2)$$

Siendo  $a_{ij}$  el centro de proyección de la regla de mapeo que siempre estará dentro de la superficie de frontera y  $b$  un parámetro adimensional ( $1 \leq b \leq \infty$ ) que es determinado en términos del estado del material sustituyendo  $\bar{\sigma}'_{ij}$  de la Ecuación 3.2 en la Ecuación 3.1 resolviendo la expresión resultante para  $b$ .

En la Figura 3.4 se muestra de manera esquemática la superficie de frontera y de la regla de mapeo en el espacio de esfuerzos efectivos y se evidencia lo descrito anteriormente.

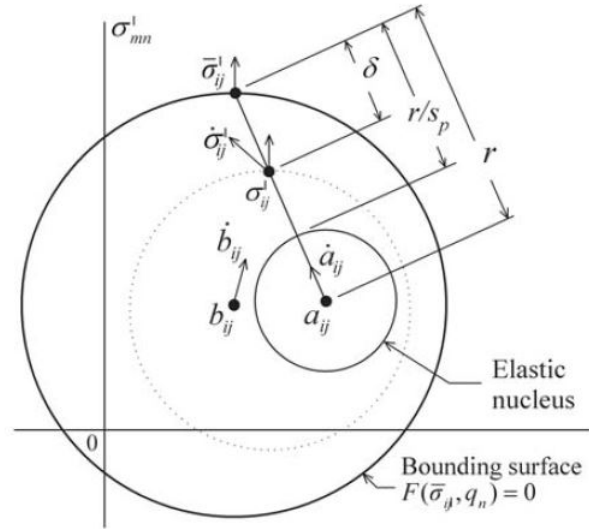


Figura 3.4: Ilustración esquemática de la superficie de frontera y de la regla de mapeo. (Nieto-Leal, 2016)

### 3.3. Modelo constitutivo *Generalized Bounding Surface Model*

Teniendo en cuenta las generalidades descritas del GBSM, se presentan a continuación los detalles del modelo asociados con la definición de invariantes de esfuerzo, descomposición de deformaciones, respuestas elásticas y plásticas, dependencia del ángulo de Lode y criterio de falla.

#### 3.3.1. Invariantes de esfuerzo

El esfuerzo efectivo  $\sigma'_{ij}$  está dado en términos del esfuerzo total  $\sigma_{ij}$  y de la presión de poros  $u$  mediante la Ecuación 3.3.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}u \quad (3.3)$$

Siendo  $\delta_{ij}$  Kroneker delta.

El tensor de esfuerzos efectivos  $\sigma'_{ij}$  puede descomponerse en la suma de un tensor esférico de esfuerzos o hidrostático y un tensor de esfuerzos desviadores  $s_{ij}$  de la manera que se muestra en las Ecuación 3.4.

$$s_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3}\sigma'_{kk}\delta_{ij} \quad \sigma_{ij} = \{\sigma'_{11}\sigma'_{22}\sigma'_{33}\sigma'_{12}\sigma'_{13}\sigma'_{23}\}^T \quad (3.4)$$

En el GBSM que emplea una regla de flujo asociada se incluye el tensor simétrico  $\alpha_{ij}$  para tener en cuenta la anisotropía del material.  $\alpha_{ij}$  describe la rotación de la superficie de frontera en el espacio de invariantes de esfuerzos, siendo esta la forma en la cual las características anisotrópicas del material son incorporadas en términos constitutivos.

En el modelo anisotrópico asociado, las invariantes de esfuerzo que se emplean para describir la superficie de frontera  $F$  son las siguientes.

$$I = \sigma'_{ij}\delta_{ij}, \quad J^\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}s_{ij}^\alpha : s_{ij}^\alpha}, \quad S^\alpha = \left(\frac{1}{3}s_{ij}^\alpha s_{jk}^\alpha s_{ki}^\alpha\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Con  $s_{ij}^\alpha$  definido por la Ecuación 3.6.

$$s_{ij}^\alpha = s_{ij} - \frac{1}{3}\alpha_{ij}\sigma'_{kk} = \sigma'_{ij}(\alpha_{ij} + \delta_{ij})\sigma'_{kk} \quad (3.6)$$

$J^\alpha$  es la segunda invariante desviadora de esfuerzos y  $S^\alpha$  es la tercera invariante desviadora reducida de esfuerzo.

El tercer invariante de esfuerzos corresponde al ángulo de Lode reducido para la superficie de potencial plástico que se presenta en la Ecuación 3.7.

$$\theta^\alpha = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left[ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{S^\alpha}{J^\alpha} \right)^3 \right], \quad -\frac{\pi}{6} \leq \theta^\alpha \leq \frac{\pi}{6} \quad (3.7)$$

La magnitud escalar en el espacio triaxial del tensor anisotrópico  $\alpha_{ij}$  es definido mediante las Ecuación 3.8.

$$\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}\alpha_{ij} : \alpha_{ij}} \quad (3.8)$$

$\alpha$  en el plano de invariantes  $I$ - $J$  es representado por  $\tilde{\alpha} = \sqrt{2/3}\alpha$ . Cuando el GBSM es simplificado a su versión isotrópica  $\alpha_{ij} = 0$  por tanto  $s_{ij}^\alpha = s_{ij}$  para definir los invariantes isotrópicos de esfuerzo  $J$ ,  $S$  y  $\theta$ .

### 3.3.2. Descomposición de deformaciones

El tensor de tasa de deformación infinitesimal  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  es definido de la misma manera que se presenta en la sección anterior mediante la Ecuación 2.1.

### 3.3.3. Definición de variables internas

Las variables internas dentro del modelo constitutivo incluyen medidas adecuadas de deformación in-elástica.

De manera general las deformaciones in-elásticas, presentadas en la Ecuación 2.1, y el centro de proyección  $a_{ij}$  son dos de las variables internas  $q_n$ . Estas variables internas evolucionan o se actualizan para cada incremento de carga o paso del tiempo y por tanto los parámetros que conforman el modelo y que son denotados con un punto superpuesto hacen parte de las variables internas que encierra  $q_n$ . El tensor  $a_{ij}$ , como se ha mencionado, representa el centro de proyección que se supone siempre está ubicado dentro de una superficie de frontera convexa y que nunca la cruza. El  $a_{ij}$  evoluciona de acuerdo con una ecuación de tasa adecuada y constituye una de las variables internas, pero no entra en la expresión analítica de la superficie de frontera.

### 3.3.4. Respuesta elástica

La respuesta elástica del material, suponiendo que la isotropía elástica es independiente de la velocidad de carga y no se altera por la deformación in-elástica, es determinada a través de tensor de constantes elásticas  $C_{ijkl}$  y el tensor de módulos elásticos  $K_{ijkl}$  los cuales se definen a continuación.

$$C_{ijkl} = \frac{2G - 3K}{18KG} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{1}{4G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.9a)$$

$$E_{ijkl} = \left( K - \frac{2}{3}G \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + G (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.9b)$$

Donde el módulo volumétrico elástico (*elastic bulk modulus*) y el módulo cortante elástico (*elastic shear modulus*) son independientes de las variables internas  $q_n$ , pero que pueden depender de los invariantes de esfuerzo.

$$\frac{1}{3} = \dot{\sigma}'_{kk} = K \dot{\varepsilon}_{ij}^e \quad (3.10)$$

$$\dot{s}_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}^e \quad (3.11)$$

Siendo  $\sigma'_{kk}/3$  es el esfuerzo efectivo medio y  $\varepsilon_{ij}^e$  el tensor de deformación elástica desviadora. El esfuerzo desviador representa, por lo tanto, la contribución cortante al estado de esfuerzos excluyendo los esfuerzos esféricos o hidrostáticos.

### 3.3.5. Respuesta plástica

El índice de carga escalar  $L$ , como se mencionó previamente, está asociado con la respuesta plástica del material. Basados en el concepto de superficie de frontera, este índice escalar es escrito en forma general como se muestra en la Ecuación 3.12.

$$L = \frac{1}{K_p} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_{ij}} d\sigma'_{ij} = \frac{1}{\bar{K}_p} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_{ij}} d\bar{\sigma}'_{ij} \quad (3.12)$$

El índice de carga escalar definido para el GBSM está dado por la Ecuación 3.13.

$$L = \frac{1}{K_p} \left[ \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \langle \phi_n \rangle \frac{1}{b} \frac{\partial F}{\partial q_n} r_n^v - \langle \phi_a \rangle \left( 1 - \frac{1}{b} \right) \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_{ij}} r_{ij}^v \right] \quad (3.13)$$

Cuando el estado de esfuerzos está sobre la superficie de frontera,  $b = 1$  con  $K_p = \bar{K}_p$  y  $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\bar{\sigma}}'_{ij}$ , la Ecuación 3.13 queda expresada como se muestra en la Ecuación 3.14.

$$L = \frac{1}{K_p} \left[ \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_{ij}} \dot{\bar{\sigma}}'_{ij} + \langle \phi_n \rangle \frac{\partial F}{\partial q_n} r_n^v \right] \quad (3.14)$$

### 3.3.6. Ángulo de Lode

El GBSM en su versión mas completa o general emplea una regla de flujo no-asociada por lo que se requiere la definición explícita de una superficie de potencial plástico y una superficie de frontera en un espacio de invariantes de esfuerzos.

Evidencia experimental bastante extensa indica que ambas superficies deberían variar con el ángulo de Lode (en forma directa o reducida) dentro del plano octaédrico. En modelos anteriores al GBSM, basados en el concepto de superficie de frontera, se supone que un parámetro genérico de modelo  $P$  asociado con una de las superficies mencionadas anteriormente que varía con el ángulo de Lode (directo o reducido) de la manera que se presenta en la Ecuación 3.15.

$$P(\theta) = g(\theta, k)P_c \quad (3.15)$$



Donde  $k = P_e/P_c$ , con  $P_e = P(-\pi/6)$  y  $P_c = P(\pi/6)$  siendo los valores de  $P$  asociados a la extensión y compresión triaxial axisimétrica respectivamente. La función adimensional  $g(\theta, k)$  debe asumir los valores  $g(-\pi/6, k) = k$  y  $g(\pi/6, k) = 1$ .

### 3.3.7. Criterio de falla

Debido a que el GBSM define el estado de falla del material a través de la teoría de estado crítico, es preciso mencionar los principales aspectos teóricos que componen esta teoría.

#### -Teoría del Estado Crítico

La teoría del estado crítico es un criterio de falla propuesto por Schofield and Wroth (1968) y que ha sido de gran importancia para definir un estado último de resistencia en el diseño de cimentaciones, taludes, muros de contención y demás obras de carácter geotécnico. Este criterio de falla nace a partir de una superficie tridimensional compuesta por los invariantes de esfuerzos  $p'$  y  $q$  y de la relación de vacíos del suelo en la que se observa que las trayectorias de esfuerzo de sigue un material hasta la falla convergen a una línea en el plano de de invariantes  $p'-q$  y que es denominada *línea de estado crítico* (Critical State Line). En la Figura 3.5 se muestra de manera gráfica la forma de esta superficie así como la línea de estado crítico.

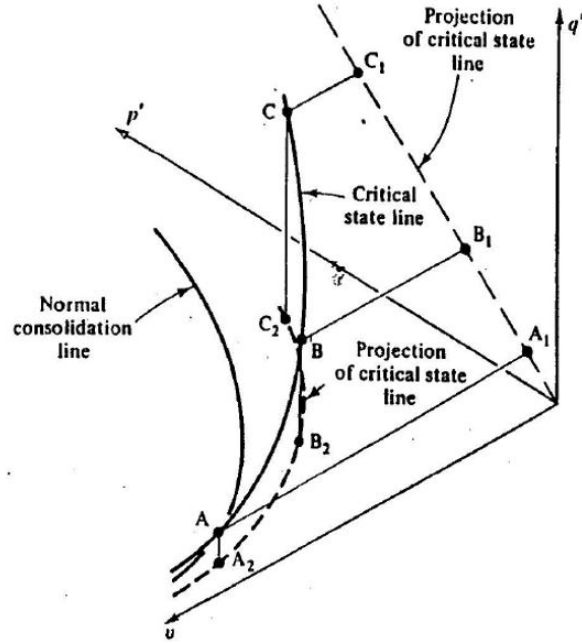


Figura 3.5: Superficie de estado crítico en el espacio  $p'$ ,  $q$  y  $e$ . (Atkinson, 1982)

La condición de estado crítico se produce cuando el estado último del material es alcanzado bajo un esfuerzo de corte y no se presentan cambios volumétricos en el material ni cambios en el esfuerzo efectivo. La condición de estado crítico es representada mediante la línea de estado crítico y que esta dada mediante la relación (3.16) de esfuerzos efectivos en plano de invariantes  $p'$  y  $q$ .

$$\frac{q}{p'} = \eta = M \quad (3.16)$$

Donde  $p'$  y  $q$  son los invariantes de esfuerzo para los que se presenta la falla y  $M$  la pendiente de la línea de estado crítico. El valor de  $M$  establece una condición última en la cual ocurren únicamente deformaciones cortantes plásticas, en la Figura 3.6 se muestra en gráficas de esfuerzos y deformaciones lo anteriormente descrito.

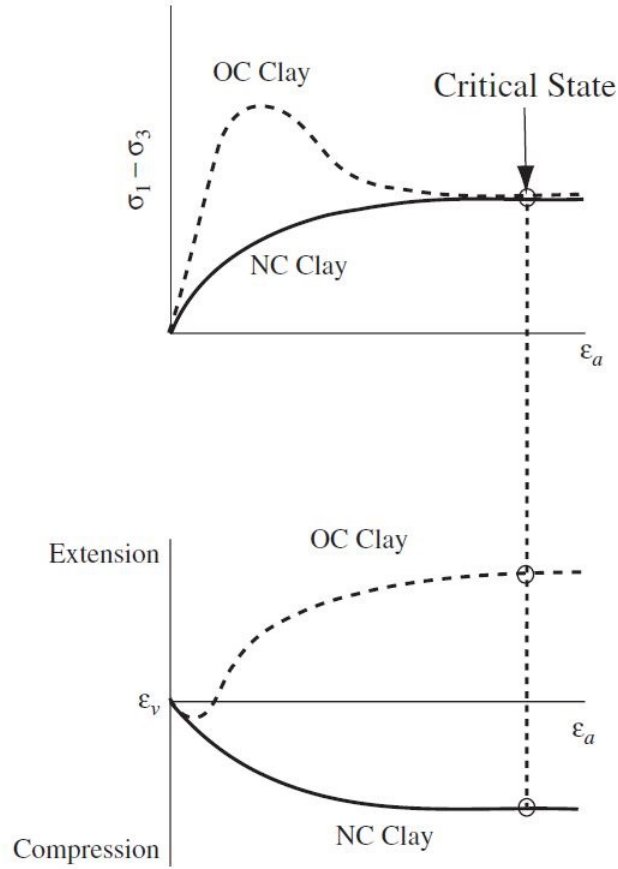


Figura 3.6: Definición del estado crítico. (Helwany, 2007)

La pendiente de la línea de estado crítico  $M$  puede ser obtenida a través del ángulo de fricción interna entre partículas  $\phi'$ , estimado mediante los círculos de falla de Mohr en términos de esfuerzos efectivos. Este valor en compresión y en extension puede ser estimado mediante las Ecuaciones 3.17 y 3.18 respectivamente.

$$M_c = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (3.17)$$

$$M_e = \frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (3.18)$$

### -Criterio de falla en el GBSM

Se asume para el GBSM que la superficie de falla es una línea recta que coincide con la línea de estado crítico, en el espacio triaxial axisimétrico ( $p-q$ ) la pendiente de la línea de estado crítico se denota con  $M$  conforme lo planteado en la teoría de estado crítico descrita previamente. En el espacio de invariantes de esfuerzo  $I-J$ , la pendiente de la línea de estado crítico es denotada por  $\tilde{M}$ , donde  $\tilde{M} = M/(3\sqrt{3})$ . En forma general la superficie de falla en el espacio de invariantes de esfuerzo  $I-J$  esta dada por:

$$\bar{J} - \tilde{M}(\theta^\alpha, k_M)\bar{I} = 0 \quad (3.19)$$

La variación de  $\tilde{M}$  respecto a  $\theta^\alpha$  ha sido descrita tradicionalmente mediante una relación que tiene la siguiente forma:

$$\tilde{M}(\theta^\alpha, k_M) = g(\theta^\alpha, k_M)\tilde{M}_c \quad (3.20)$$

Donde  $k_M = M_e/M_c = \tilde{M}_e/\tilde{M}_c$ , con  $M_e = M(-\pi/6)$  y  $M_c = M(\pi/6)$  siendo los valores de  $M$  asociados con la extensión y compresión triaxial axisimétrica respectivamente. La función adimensional  $g(\theta, k_M)$  debe de tomar los valores de  $g(-\pi/6, k) = k_M$  y  $g(\pi/6, k) = 1$ , la forma funcional específica para  $g$  recomendada por Nieto-Leal (2016) corresponde a la propuesta mencionada por Sheng et al. (2000).

### 3.3.8. Flujo plástico y Forma específica de la superficie de frontera

Cuando el GBSM emplea una regla de flujo asociada únicamente se requiere la definición explícita de una superficie de frontera  $F$ , de la cual se obtiene el gradiente de segundo orden  $R_{ij}$ . Este gradiente en un punto de esfuerzos de “imagen”  $(\bar{I}, \bar{J})$  sobre la superficie de frontera es calculado como  $R_{ij} = \partial F / \partial \bar{\sigma}'_{ij}$ . A continuación se define en forma general la superficie de frontera  $F$ .

Cuando el GBSM emplea una **regla de flujo asociada**, la superficie de potencial plástico se vuelve idéntica a la superficie de frontera ( $F \equiv Q$ ). En la Ecuación 3.21 se tiene la expresión

que denota a la superficie de frontera cuando se emplea una regla de flujo asociada.

$$F(\bar{\sigma}'_{ij}, \alpha, I_0) = (\bar{J}^\alpha)^2 (R-1)^2 \frac{\omega^2}{27} \left( \bar{I} + \frac{R-2}{R} I_0 \right) (\bar{I} - I_0) = 0 \quad (3.21)$$

$R$  es un parámetro de modelo adimensional que controla la forma de la superficie elíptica.  $\bar{J}^\alpha$  es la segunda invariante desviadora de esfuerzos *reducida* en el punto de “imagen” de esfuerzos.  $\omega^2$  es denotado por la siguiente Ecuación 3.22.

$$\omega^2 = \frac{M - \alpha}{2} \left[ 2\alpha(R-1)^2 + M - \alpha + \sqrt{4\alpha(R-1)^2 M + (-\alpha)^2} \right] \quad (3.22)$$

Donde  $\alpha$  es una variable anisotrópica adimensional ya mencionada anteriormente y que será definida mas adelante.  $M$  es la pendiente de la línea de estado crítico en una sección meridional en el espacio  $p$ - $q$  que en el espacio de las invariantes de esfuerzo  $I$ - $J$  es representada por  $\tilde{M} = M/(3/\sqrt{3})$ .  $M$  varia con el ángulo *reducido* de Lode  $\theta^\alpha$  de acuerdo con la Ecuación 3.23.

$$M(\theta^\alpha) = g(\theta^\alpha, k_M) M_c \quad (3.23)$$

Donde  $k_M = M_e/M_c$ , con  $M_e = M(-\pi/6)$  y  $M_c = M(\pi/6)$  siendo los valores de  $M$  asociados con la extensión y compresión triaxial axisimétrica respectivamente. La función adimensional  $g(\theta^\alpha, k_M)$  es obtenida mediante la expresión la propuesta por Sheng et al. (2000) y recomendada por Nieto-Leal (2016), reemplazando  $\theta$  y  $k$  por  $\theta^\alpha$  y  $k_M$  respectivamente.

### 3.3.9. Forma específica de la función de endurecimiento

El GBSM utiliza la forma funcional de  $\hat{H}$  descrita por la Ecuación 3.24.

$$\hat{H} = \frac{1 + e_{in}}{\lambda - \kappa} P_a \left[ 9(F, \bar{I})^2 + \frac{1}{3}(F, \bar{J})^2 \right] [h(\theta)z^{0,02} + h_0(1 - z^{0,02})] f \quad (3.24)$$

Donde  $P_a$  es la magnitud de la presión atmosférica incluida para dar a  $\hat{H}$  las unidades adecuadas de esfuerzo al cubo.  $z = J/J_1 = JR/N I_0$  es una variable adimensional, y la magnitud de  $h_0$  representa el parámetro de endurecimiento para estados cercanos al eje  $I$  (i.e para  $z \approx 0$ ). La magnitud de  $h_0$  se incluye para garantizar la continuidad cuando el punto de esfuerzos cruza el eje  $I$ , mejorando así el comportamiento numérico en esta región.

La magnitud adimensional  $h(\theta)$  define el grado de endurecimiento de los puntos dentro de la superficie de frontera, excepto los que se encuentran en las inmediaciones del eje  $I$  donde  $z \rightarrow 0$ . De todas las magnitudes de endurecimiento,  $h(\theta)$  desempeña un papel fundamental y significativo. Es una función del ángulo de Lode y varía en magnitud desde un valor de  $h_c = h(\pi/6)$  (correspondiente a un estado de compresión triaxial axisimétrica) a un valor de  $h_e = h(-\pi/6)$  (correspondiente a una extensión triaxial axisimétrica del estado). Esta interpolación está dada por la Ecuación 3.25.

$$h(\theta) = g(\theta, \mu)h_c = \frac{2\mu}{1 + \mu - (1 - \mu) \sin 3\theta} h_c; \quad \text{donde } \mu = h_e/h_c \quad (3.25)$$

La expresión propuesta por Nieto-Leal (2016) para  $f$  esta se presenta en la Ecuación 3.26

$$f = \frac{1}{2} \left[ a + \text{sign}(n_I) (|n_I|)^{\frac{1}{5}} \right] \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (3.26)$$

Donde  $a$  es un parámetro de modelo adimensional mayor que la unidad, y la magnitud de  $n_I$  es el componente en la dirección  $I$  de la unidad hacia afuera normal a la superficie de frontera en el espacio de invariantes de esfuerzos.  $\dot{I}_0$  es definido mediante la Ecuación 3.27.

$$\dot{I}_0 = \frac{(1 + e_{in})}{\lambda - \kappa} (\langle I_0 - I_L \rangle + I_L) \dot{\varepsilon}_{kk}^i \quad (3.27)$$

Siendo  $\lambda$  y  $\kappa$  los parámetros definidos en la teoría de la elastoplasticidad asociados al modelo Cam Clay Modificado. La magnitud de  $I_L$  es valor límite diferente de cero tal que  $I < I_L$ ,  $I_L$  no es un parámetro del modelo y es tomado usualmente igual que el valor de la presión atmosférica  $P_a$ .

### 3.3.10. Regla de endurecimiento rotacional

El GBSM incluye dentro de su formulación unas expresiones de endurecimiento mejoradas para la superficie de potencial plástico y la superficie de frontera. Estas expresiones son llamadas *reglas de endurecimiento rotacional*, las cuales fueron escritas para representar de alguna manera fenómenos que ocurren dentro de la micro-estructura del suelo y que son asociados, en términos de macro-estructura, al comportamiento anisotrópico de los suelos cohesivos. Las leyes de endurecimiento rotacional propuestas por Nieto-Leal (2016) para el

GBSM incluyen características que mejoran la simulación de los suelos cohesivos anisotrópicamente consolidados.

La regla de endurecimiento rotacional para la superficie de frontera evoca dependencia tanto en los incrementos de deformación plástica volumétrica ( $\dot{\epsilon}_v^P$ ) como cortante ( $\dot{\epsilon}_s^P$ ), por lo cual, la evolución de la anisotropía ha sido vinculada a la evolución no solo de la deformación volumétrica, sino también de la deformación cortante. La regla de endurecimiento rotacional para la superficie de frontera se presenta en la Ecuación 3.28.

$$\dot{\alpha}_{ij} = \left( \frac{1 + e_{in}}{\lambda - \kappa} \right) \left[ \psi_1 \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 |\chi_\eta \tilde{\eta} - \tilde{\alpha}| |\dot{\epsilon}_v^P| + \psi_2 f_n f_{I_0} \langle \tilde{M} - \tilde{\eta} \rangle |\dot{\epsilon}_s^P| \right] \frac{s_{ij}^\alpha}{I_0} \text{sign}(M - \alpha) \quad (3.28)$$

Siendo  $f_n = 0$  si  $\Delta\eta = 0$  o  $f_n = 1$  si  $\Delta\eta > 0$  y  $f_{I_0} = \frac{10}{1 + 100\exp(-I_0/I)}$ .

Donde  $e_{in}$  es la relación de vacíos inicial,  $\lambda$  y  $\kappa$  parámetros asociados al estado crítico,  $\tilde{\eta} = J/I$ ,  $\chi_\eta$ ,  $\psi_1$  y  $\psi_2$  parámetros del modelo. La medida de la anisotropía en el espacio triaxial axisimétrico es definido por el escalar  $\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}\alpha_{ij} : \alpha_{ij}}$  y en el espacio de invariantes de esfuerzo  $I$ - $J$  por  $\tilde{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}\alpha}$ .

Adicionalmente, El GBSM requiere la especificación de la anisotropía inherente o inicial. La anisotropía inicial esta dada por el valor inicial del tensor  $\alpha_{ij}$ . El valor inicial de este tensor puede ser calculado a través de la Ecuación 3.29.

$$\alpha_{11}^{in} = \frac{2A(1 - K_{in})}{1 + 2K_{in}} \quad \alpha_{22}^{in} = \alpha_{33}^{in} = -\frac{A(1 - K_{in})}{1 + 2K_{in}} = -\frac{1}{2}\alpha_{11}^{in} \quad (3.29)$$

Con  $\alpha_{12}^{in} = \alpha_{21}^{in} = \alpha_{13}^{in} = \alpha_{31}^{in} = \alpha_{23}^{in} = \alpha_{32}^{in} = 0$ . Donde  $K_{in}(= K = K_0 = \sigma'_3/\sigma'_1)$  es la relación de esfuerzos iniciales del proceso de consolidación en condiciones anisotrópicas.  $A$  es una constante del estado del esfuerzos inicial cuyo valor varía entre 0.65 y 1.00 (Ling et al., 2002), según Nieto-Leal (2016) el valor de 2/3 para  $A$  representa una aproximación adecuada en ausencia de información experimental.

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se presenta detalladamente el procedimiento realizado para la simulación numérica de suelos cohesivos consolidado isotrópicamente y anisotrópicamente empleando el modelo constitutivo GBSM. Adicionalmente se describe el procedimiento o rutina de calibración de los parámetros asociados al modelo constitutivo.

El procedimiento que se llevó a cabo para la simulación de ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) se describe a continuación:

1. *Recolección de información experimental*: Se realiza una búsqueda en trabajos de grado y artículos científicos de ensayos triaxiales CU en los cuales se reportarán gráficas trayectorias de esfuerzos, curvas esfuerzo - deformación y curvas exceso de presión de poros - deformación, adicionalmente, que reportarán los valores asociados al ensayo ( $p_c, p_0$ ) y los valores de los parámetros asociados a la elasticidad ( $\nu, G$ ) y al estado crítico ( $\lambda, \kappa, M_c, M_e$ ) o información de donde se pudiesen deducir.

2. *Digitalización de información experimental*: Una vez recopilada información experimental de los ensayos triaxiales CU a través de graficas se procede a su digitalización empleado el software de acceso libre *Plot Digitizer*, esto, con el fin de poder procesar posteriormente dicha información. Los datos obtenidos se ingresan a un archivo de Microsoft Excel, el cual permite recrear las gráficas necesarias de comparación, como se muestra en la Figura 4.1.



Soil description: Compression		Experimental data: effective stress paths				Pini=	275.80	OCR =	1.00
OCR =	1.00								
p' (kPa)	q (kPa)	eps (%)	q (kPa)	eps (%)	u (kPa)			p' (kPa)	q (kPa)
278.34	1.67	0.26	57.12	0.00	1.68			348.35	1.4
264.32	57.73	0.56	85.64	0.36	41.93			330.56	76.
255.65	79.15	0.85	100.72	0.51	57.02			314.93	104.
248.72	93.97	1.25	112.40	0.81	72.06			306.25	119.
236.65	112.06	2.67	135.65	1.25	83.69			288.98	138.
210.91	131.72	3.90	145.48	2.54	111.87			256.33	160.
197.14	148.15	5.13	150.26	3.73	128.32			225.52	168.
183.41	159.63	6.46	153.35	5.21	134.58			213.48	176.
		7.78	154.75	6.39	137.57			211.65	189.
		8.96	157.87	7.77	143.86				
		10.34	159.26	9.00	148.51				
		11.61	155.63	10.23	151.49				
		12.05	145.45	11.76	152.69				
		12.78	99.89	12.20	149.19				
				12.89	143.93				

Figura 4.1: Digitalización de información experimental

3. *Escritura del archivo de entrada (input) para realizar simulaciones numéricas:* Para la simulación de ensayos triaxiales CU, empleando el modelo constitutivo GBSM, el programa Calbr8 lee un archivo de formato .dat el cual contiene las características de la simulación del ensayo, las propiedades del material, y los valores de los parámetros que configuran el modelo constitutivo. A continuación se muestra la estructura de este archivo input:

CKoUC (OCR = 1.00) of LCT (Gens, 1982). GBSM.<sup>1</sup>

0 13 15 0.01 0.30 0 0

0.996<sup>2</sup> 289.83<sup>3</sup> 165.49<sup>4</sup> 165.49<sup>5</sup> 0.0 0.0 0.0

289.83<sup>6</sup> 165.49<sup>7</sup> 165.49<sup>8</sup> 0.0 0.0 0.0 0.0

0.27<sup>9</sup> -0.13<sup>10</sup> -0.13<sup>11</sup> 0.0 0.0 0.0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

2<sup>12</sup> 1 1 5 1 1 2

1 1 0 1 0

0.14<sup>13</sup> 0.05<sup>14</sup> 1.15<sup>15</sup> 0.77<sup>16</sup> 0.20<sup>17</sup> 33.8 101.40

2.80<sup>18</sup> 0.26<sup>19</sup> 1.20<sup>20</sup>

4.00<sup>21</sup> 1.00<sup>22</sup> 1.20<sup>23</sup> 0.0

1.00 1.00 300<sup>24</sup> 2.5<sup>25</sup> 1.0<sup>26</sup>

2.0 0.0 1.0 20.0 0.0

1

1.0E+09 1.0 0

1 0.15<sup>27</sup> 0 165.49<sup>7</sup> 0 165.49<sup>8</sup> 1 0.0 1 0.0 1 0.0 0 200 1.0

1 1 1 1 0

1

-1

-1 -1

Donde:

1. Título (máximo 71 caracteres con espacios).
2. Relación de vacíos inicial  $e_{in}$ .
3. Esfuerzo de consolidación  $\sigma_{1c}$  (kPa).
4. Esfuerzo de consolidación  $\sigma_{2c}$  (kPa).
5. Esfuerzo de consolidación  $\sigma_{3c}$  (kPa).
6. Esfuerzo de inicial del ensayo  $\sigma_{1ini}$  (kPa).
7. Esfuerzo de inicial del ensayo  $\sigma_{2ini}$  (kPa).
8. Esfuerzo de inicial del ensayo  $\sigma_{3ini}$  (kPa).

9. Valor de  $\alpha_{11}^{in}$  (Ecuación (3.29)).
10. Valor de  $\alpha_{22}^{in}$  (Ecuación (3.29)).
11. Valor de  $\alpha_{33}^{in}$  (Ecuación (3.29)).
12. Modelo Isotrópico=1, Modelo Anisotrópico=2.
13. Valor de  $\lambda$ .
14. Valor de  $\kappa$ .
15. Valor de  $M_c$  (Ecuación (3.17)).
16. Valor de la relación  $M_e/M_c$  (Ecuaciones (3.17) y (3.18)).
17. Valor de la relación de Poisson  $\nu$ .
18. Valor del parámetro  $R$ .
19. Valor del parámetro  $C$ .
20. Valor del parámetro  $s_p$ .
21. Valor del parámetro  $h_c$ .
22. Valor de la relación de parámetros  $h_e/h_c$ .
23. Valor del parámetro  $a$ .
24. Valor del parámetro  $\psi_1$ .
25. Valor del parámetro  $\chi_\eta$ .
26. Valor del parámetro  $\psi_2$ .
27. Deformación máxima  $\varepsilon_{max}$ , valor positivo indica compresión y valor negativo indica extensión.

4. *Realización de simulaciones numéricas*: Una vez escrito el archivo input con toda la información necesaria, se ejecuta el programa de elementos finitos Calbr8(Kaliakin, 1992) y se realiza el siguiente procedimiento:

4.1. Se le indica al programa el nombre del archivo que contiene la información de la simulación escribiendo también su extensión (.dat) seguido de un enter para cargar el archivo.(Figura 4.2)

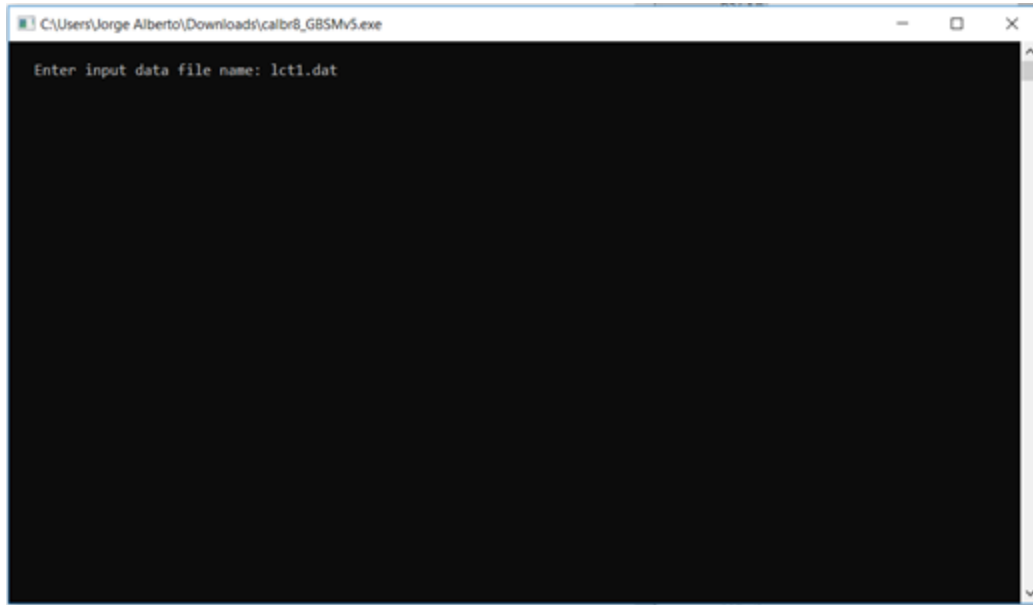


Figura 4.2: Realización de simulaciones numéricas: Paso 1

4.2. Se le indica al programa el nombre del archivo de salida con el que queremos que el programa lo guarde seguido de un enter para confirmar. Este archivo mostrara un informe de la simulación.(Figura 4.3)

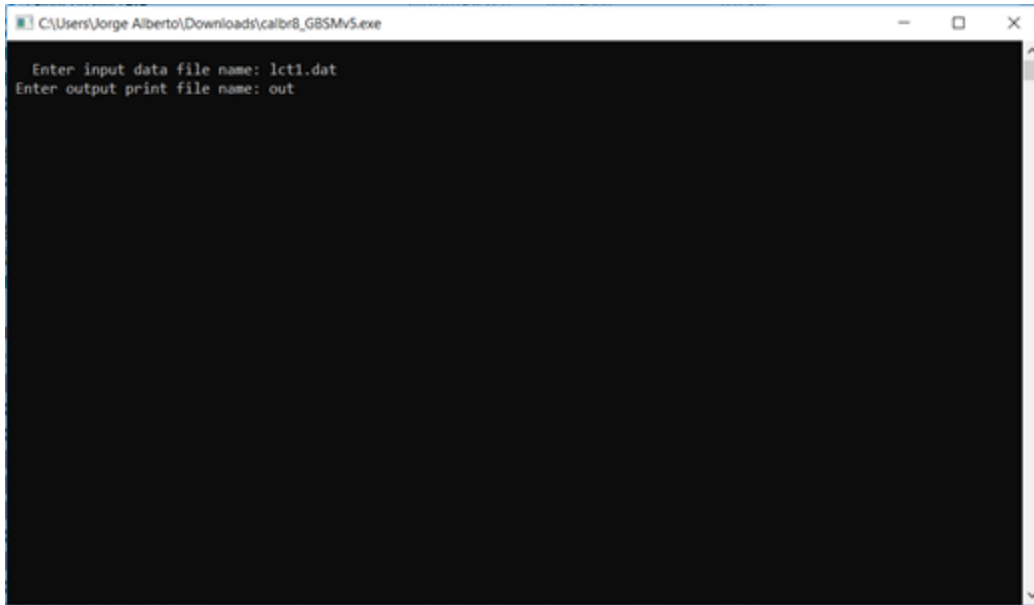


Figura 4.3: Realización de simulaciones numéricas: Paso 2

4.3. Se le indica al programa que no se requiere datos de una ejecución anterior escribiendo “n” (no), seguido de un enter que confirma la indicación.(Figura 4.4)

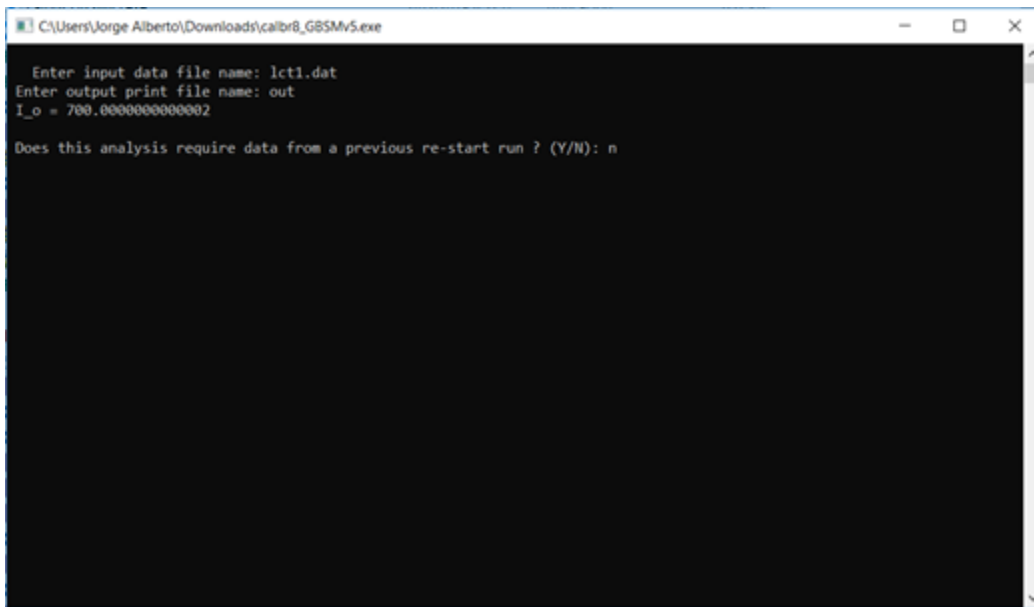
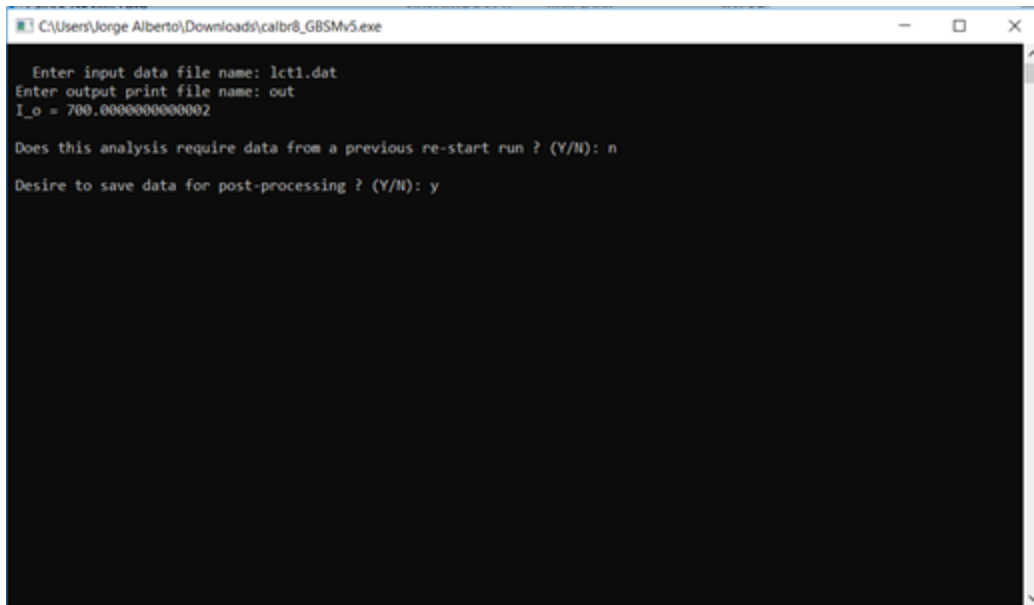


Figura 4.4: Realización de simulaciones numéricas: Paso 3

4.4. Se le indica al programa que si se desea guardar la información de la simulación para su posterior procesamiento escribiendo “y” (yes), seguido de un enter que confirma la

indicación.(Figura 4.5)



```
C:\Users\Jorge Alberto\Downloads\calbr8_GBSMv5.exe
Enter input data file name: lct1.dat
Enter output print file name: out
I_o = 700.00000000000002
Does this analysis require data from a previous re-start run ? (Y/N): n
Desire to save data for post-processing ? (Y/N): y
```

Figura 4.5: Realización de simulaciones numéricas: Paso 4

4.5. Se le indica al programa la forma de guardar la información de la simulación. Se escribe y/o selecciona la opción 12 seguida de un enter, esta opción tabulara de manera separada para cada deformación las variables del estado critico ( $p'$  y  $q$ ) y la presión de poros.(Figura 4.6)

```
C:\Users\Jorge Alberto\Downloads\calbr8_GBSMv5.exe

Enter input data file name: lct1.dat
Enter output print file name: out
I_o = 700.0000000000002

Does this analysis require data from a previous re-start run ? (Y/N): n

Desire to save data for post-processing ? (Y/N): y

Options for saving data:
    ALL stored data in column form: (enter 0)
    Total stresses, strains & pore pressure: (enter 1)
    Critical State variables & pore pressure: (enter 2)
    MIT variables & pore pressure: (enter 3)
    Custom format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 4)
    Custom format for DRAINED true triaxial tests: (enter 5)
    Variation of Ko with sig_11: (enter 6)
    Format for 1-d models: time, eps_11, sig_11: (enter 7)

    TAB Total stresses, strains & pore pressure: (enter 11)
    TAB separated Critical State variables & pore pressure: (enter 12)
    TAB separated MIT variables & pore pressure: (enter 13)
    TAB separated format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 14)
    TAB separated format for DRAINED true triaxial tests: (enter 15)
    Option chosen = 12
```

Figura 4.6: Realización de simulaciones numéricas: Paso 5

4.6. Se le indica al programa el nombre del archivo post-procesamiento con el que queremos que el programa lo guarde seguido de un enter para confirmar. Este archivo mostrará de manera tabulada la información de la simulación de conformidad con la opción seleccionada en el paso anterior.(Figura 4.7)

```
C:\Users\Jorge Alberto\Downloads\calbr8_GBSMv5.exe

Enter input data file name: lct1.dat
Enter output print file name: out
I_o = 700.0000000000002

Does this analysis require data from a previous re-start run ? (Y/N): n

Desire to save data for post-processing ? (Y/N): y

Options for saving data:
    ALL stored data in column form: (enter 0)
    Total stresses, strains & pore pressure: (enter 1)
    Critical State variables & pore pressure: (enter 2)
    MIT variables & pore pressure: (enter 3)
    Custom format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 4)
    Custom format for DRAINED true triaxial tests: (enter 5)
    Variation of Ko with sig_11: (enter 6)
    Format for 1-d models: time, eps_11, sig_11: (enter 7)

    TAB Total stresses, strains & pore pressure: (enter 11)
    TAB separated Critical State variables & pore pressure: (enter 12)
    TAB separated MIT variables & pore pressure: (enter 13)
    TAB separated format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 14)
    TAB separated format for DRAINED true triaxial tests: (enter 15)
    Option chosen = 12

Enter post-processing filename: Resultado
```

Figura 4.7: Realización de simulaciones numéricas: Paso 6

4.7. Finalmente, se le indica al programa que no se desea guardar información para un reinicio escribiendo “n” (no) seguido de un enter.(Figura 4.8)

```
C:\Users\Jorge Alberto\Downloads\calbr8_GBSMv5.exe
Enter input data file name: lct1.dat
Enter output print file name: out
I_o = 700.0000000000002

Does this analysis require data from a previous re-start run ? (Y/N): n

Desire to save data for post-processing ? (Y/N): y

Options for saving data:
    ALL stored data in column form: (enter 0)
    Total stresses, strains & pore pressure: (enter 1)
    Critical State variables & pore pressure: (enter 2)
    MIT variables & pore pressure: (enter 3)
    Custom format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 4)
    Custom format for DRAINED true triaxial tests: (enter 5)
    Variation of Ko with sig_11: (enter 6)
    Format for 1-d models: time, eps_11, sig_11: (enter 7)

    TAB Total stresses, strains & pore pressure: (enter 11)
    TAB separated Critical State variables & pore pressure: (enter 12)
    TAB separated MIT variables & pore pressure: (enter 13)
    TAB separated format for UNDRAINED true triaxial tests: (enter 14)
    TAB separated format for DRAINED true triaxial tests: (enter 15)
    Option chosen = 12

Enter post-processing filename: Resultado

Desire to save data for future re-start ? (Y/N): n
```

Figura 4.8: Realización de simulaciones numéricas: Paso 7

El resumen de las simulaciones a las cuales nombramos “out”, es un documento que se puede visualizar como un archivo .dat, en el cual se observa el resumen de las iteraciones hechas por el programa, como se muestra a continuación en las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11.



```
////////////////////////////////////  
/                               /  
/      calbr8: version 3.14: 20.02.16      /  
/                               /  
/    DATE OF ANALYSIS :: day:03 month:03 year:19    /  
/                               /  
/    ANALYSIS INITIATED AT TIME :: 20:36:43    /  
/                               /  
////////////////////////////////////
```

CKoUC (OCR = 1.00) of LCT (Gens, 1982). GBSM. 233.33

INPUT DATA:  
=====

Analysis options:  
=====

--> Reformulated nearly-incompressible analysis  
--> Engineering stresses and strains assumed

Iteration and convergence parameters:  
=====  
Max number of global iterations = 15  
Maximum error tolerance = 0.010  
Convergence acceleration factor = 0.300

Generalized Bounding Surface Model for Cohesive Soils  
-----

Figura 4.9: Realización de simulaciones numéricas: Archivo out (Parte 1)

Generalized Bounding Surface Model for Cohesive Soils

Analysis options based on integer flags input:

- 
- > Anisotropic model.
- > Non-associative flow rule used.
- > Bounding surface consists of a single ellipse.
- > Modified shape hardening function for single ellipse surface including degradation under cyclic loading & n\_p replaced by n\_I.
- > Usual f(delta) function used.
- > RH without critical anisotropic state (CAS).
- > Lode angle function proposed by Sheng et al. (2000) used.
- > Isotropic elastic idealization used.
- > Standard (straight line) critical state failure criterion used.
  
- > Time and rate-independent model.
- > Overstress function used: POWER form.
- > Viscosity parameter is a function of I and J.

Values of Model Parameters:

Critical state parameters:

-----  
|      Lambda = 0.066              Kappa = 0.008  
          Mc = 1.180                Me/Mc = 0.730

          Poisson's ratio = 0.290  
Transitional stress, P\_l = 3.380E+01  
Atmospheric pressure = 1.014E+02

Parameters defining the bounding surface:

-----  
          Nc = 0.960                Ne/Nc = 1.250  
  
          Shape parameter, R = 2.300  
Projection center parameter, C = 0.500  
Elastic nucleus parameter, Sp = 1.800

Figura 4.10: Realización de simulaciones numéricas: Archivo out (Parte 2)

```
out: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Shape Hardening Parameters:
-----
Hc = 5.000      He/Hc = 5.000
a = 2.500      Omega = 0.000

Threshold deviatoric stress = 0.000E+00

Rotational Hardening Parameters:
-----

psi_1 = 2.000E+02    chi_eta = 2.100E+00    psi_2 = 2.700E+01

CKoUC (OCR = 1.00) of LCT (Gens, 1982). GBSM. 233.33

Input data:
=====

Parameters defining the initial state:
=====

Void ratio = 0.432

Total stresses defining pre-consolidation pressure:
-----
sig-11 = 3.500E+02
sig-22 = 1.750E+02
sig-33 = 1.750E+02
sig-12 = 0.000E+00
sig-13 = 0.000E+00
sig-23 = 0.000E+00

Confining pressures (total stresses):
-----
sig-11 = 3.500E+02
sig-22 = 1.750E+02
```

Figura 4.11: Realización de simulaciones numéricas: Archivo out (Parte 3)

El archivo “resultado”, muestra los resultados de las iteraciones que hizo el programa, arrojando un archivo .dat, como se muestra a continuación en la Figura 4.12.

sig-1/sig-3	q	p'	eps-vol	eps-dev	eps-1	u	alpha	beta	e_accum
1.9999999999999999	175.	231.33333333333335	226.79348242409387	0.	0.	0.33	0.75	0.	0.05
2.196402483772203	193.	97778290064257	226.79348242409387	0.000001285773710509198	0.04999957114872009	0.	0.33	0.75	0.05
3.1356415417823113	200.	1242223018798	216.54185513648252	0.00000251662186706723	0.099999161126004	0.1	25.166218964203743	0.34136009568173735	0.75
4.446034280952058	201.	67722511175737	206.69492932933758	0.000003553081168704026	0.14999981606969784	0.15	35.530812374561802	0.35168639860655326	0.76
5.58563680545752	201.	22604524706492	197.86359562562237	0.000004421751874323815	0.19999952627484596	0.2	44.211752790045466	0.3620466001503673	0.77
6.618319057367186	199.	81416248893862	190.0748561232364	0.000005152986356149122	0.24999828233776678	0.25	55.52986470648225	0.3717753381852555	0.78
7.688204152900503	197.	9596637776133	183.24295428028822	0.00000577949496929750855	0.299998075349965	0.3	57.27040810323605	0.3751832334673029	0.78
8.7540644133950356	195.	58152812730757	177.28692483681875	0.000006304824761912539	0.34999789566195248	0.35	63.048024920560518	0.3751832334	0.78
9.8067310468374536	194.	01211560936748	172.0536585723976	0.000006701794482915673	0.39999776608932256	0.4	67.617046666879517	0.3751832334673029	0.78
10.851162969852763	192.	11146752812266	167.42760476260457	0.000007160954902012476	0.44999701301482666	0.45	71.6095510800834	0.3751832334	0.78
11.9054043484879167	190.	30722893017675	163.3134423654876	0.000007512239378563296	0.49999749591997833	0.5	75.12239607349277	0.3751832334	0.78
12.9491748848434762	188.	61039996919038	159.6343799077508	0.0000078237575281628842	0.5499973922413212	0.55	78.23575532262516	0.3751832334	0.78
13.999999514732223	187.	02328659852188	156.12881569466583	0.000008101227709023454	0.5999972995984891	0.6	81.01227983546988	0.3751832334	0.78
14.027837548563728	185.	543546466029	153.34607884609256	0.000008350176700132675	0.6499972192435866	0.65	83.59176997793828	0.3751832334	0.78
15.063360544186011	184.	16644225963306	150.644204758784	0.000008576448007406287	0.6999971418530107	0.7	85.7444032771386	0.3751832334	0.78
16.096679346952403	182.	8851656555311	148.18880988167928	0.000008777324057244323	0.7499970742249712	0.75	87.77324400147916	0.3751832334	0.78
17.12797015179035	181.	6964271978443	145.9583279790763	0.000008961513927110976	0.7999970150225003	0.8	89.61542493468865	0.3751832334	0.78
18.1574127686739062	180.	59098733547398	143.90420187041337	0.000009129278802106483	0.8499969569866772	0.85	91.29279190809598	0.3751832334	0.78
19.1851664780435898	179.	56375336875632	142.0292737129197	0.000009282538661659794	0.8999969084036491	0.9	92.82531873627517	0.3751832334	0.78
20.211298086086251	178.	60894424118825	140.38737349322885	0.00000942289468932271	0.94999685790250819	0.95	94.2284125404903	0.3751832334	0.78
21.2350007641934076	177.	72114387720846	138.7227980962485	0.000009551757769107883	0.9999968164802863	1.0	95.5175822638092	0.3751832334	0.78
22.2592919096978954	176.	8953054486892	137.26189479575442	0.00000967012822340844	1.0499967795795532	1.05	96.70328207906	0.3751832334	0.78
23.28132586838162	175.	12656343868152	135.91222434456955	0.000009779662510280701	1.0999967401119937	1.1	97.79663813270704	0.3751832334	0.78
24.302172691916613	174.	11088220409137	134.66392950179443	0.000009880635930964443	1.149996706541639	1.15	98.80636456621822	0.3751832334	0.78
25.32185624650371	174.	74430865902192	133.5875075921824	0.0000099740934397446267	1.199996675321339	1.2	99.7403446644598	0.3751832334	0.78
26.3449540785897208	174.	12317818010166	132.43548857962637	0.0000100695756510007451	1.24999664648895918	1.25	100.6055708137231	0.3751832334	0.78
27.3581999893838258	173.	5441087759275	131.43985398782812	0.00001014081966948233	1.2999966197261825	1.3	101.40820263665795	0.3751832334	0.78
28.3740161930128756	173.	88420261409504	130.52434416384873	0.00001021517371987802	1.3499965987460818	1.35	102.1532337416433	0.3751832334	0.78
29.3907598425720233	173.	50845215822075	129.65313822167474	0.000010284700609989456	1.3999965717658232	1.4	102.8470240771459	0.3751832334	0.78
30.405763878028415	172.	03032186709598	128.8510094070752	0.00001034924245277985	1.4499965502518528	1.45	103.49243115527263	0.3751832334	0.78
31.4199808727018343	171.	50142393617026	128.10325073745284	0.000010409388305140932	1.4999965302832126	1.5	104.09388990791977	0.3751832334	0.78
32.43454043440854	171.	1815529471309	127.40561171336496	0.000010465489884512597	1.5499965159476345	1.55	104.65480951566128	0.3751832334	0.78
33.446224418683782	170.	7988874030288	126.75424420154293	0.000010517964239537249	1.599996494844459	1.6	105.1786515994493	0.3751832334	0.78
34.458330257446342	170.	44095446619923	126.1454559561329	0.0000105667983228856	1.6499964777329679	1.65	105.6679958571618	0.3751832334	0.78
35.4680972526232027	170.	1866338170961	125.5766795351197	0.0000106125532037607	1.6999964709254622	1.7	106.12553080389584	0.3751832334673029	0.78
36.48069105422639	169.	794119183337	125.0443925917845	0.000010655363913425475	1.7499964532297456	1.75	106.5536471359772	0.3751832334	0.78
37.4910800311056397	169.	5019546471649	124.54617771426743	0.000010695446241160145	1.79999643485043	1.8	106.95447063477027	0.3751832334	0.78
38.5007935389205285	169.	22874342305641	124.07966611818905	0.000010732996656367955	1.8499964276388923	1.85	107.3297502281252	0.3751832334	0.78
39.5180740026163792	168.	97324960311213	123.6424596260741	0.00001076819482451116	1.8999964160808573	1.9	107.6819569836687	0.3751832334	0.78

Figura 4.12: Realización de simulaciones numéricas: Archivo resultado)

5. Visualización gráfica de las simulaciones: Después de haber realizado la simulación numérica, se procede a graficar los resultados de la simulación que quedaron guardados dentro del archivo de post-procesamiento. Este archivo tiene una extensión .dat y se abre con el programa Microsoft Excel de la siguiente manera:

5.1. Se ejecuta el programa Microsoft Excel.

5.2. En la pestaña de inicio se escoge la opción abrir y se selecciona el archivo de post-procesamiento. La ventana de selección mostrara este tipo de archivo cuando se tenga activada la visualización todos los archivos.

5.3. Cuando se selecciona el archivo y se abre aparecerá una ventana llamada asistente para importar texto. En esta ventana se seleccionará la opción delimitado fijo y se dará clic en siguiente. Por último, se seleccionarán los separadores tabulación y espacio y se dará en clic en finalizar.

5.4. Se copian los resultados de eps-1, p', q y u en una hoja de Microsoft Excel y se grafican las curvas: p' vs. q, eps-1 vs. q y u vs. eps-1.

6. Calibración de los parámetros del GBSM: De manera iterativa, se varían los parámetros

asociados al GBSM en el paso 3 y se realizan los pasos 4 y 5 para calibrar los parámetros del GSBM. Los valores iniciales de los parámetros con los que se puede iniciar este proceso son presentados por Kaliakin (2014). Adicionalmente, se calibran estos parámetros en el siguiente orden:

- Se inicia con el parámetro  $R$ , para un  $OCR = 1$ .
- Se recomienda seguir con el parámetro  $C$ , para  $OCR = 2,0$  y  $3,0$ , como término medio.
- Finalmente, para  $OCR \geq 4,0$  se recomienda calibrar los parámetros  $a$ ,  $S_p$ ,  $h_c$  y  $h_e$  (tanto en compresión como en extensión).

Es de resaltar que este no es un orden estricto sino con el cual se llevó a cabo el proceso de calibración. En el capítulo 5 se muestra el comportamiento que tiene cada parámetro de acuerdo con la variación de los valores asignados.

# Capítulo 5

## Parametrización del modelo constitutivo *GBSM*

La parametrización del modelo GBSM en su versión isotrópica asociada y su versión anisotrópica asociada se presenta en este capítulo. Se describe la incidencia y sensibilidad de los parámetros  $R$ ,  $C$ ,  $a$ ,  $h_c-h_e$  y  $s_p$  en la simulación y calibración de la arcilla Cardiff Kaolin estudiada por Stipho (1978). El parámetro de endurecimiento rotacional  $\psi_2$  se calibra para la arcilla Georgia Kaolin estudiada por Sheu (1984) (no se calibran los parámetros de endurecimiento rotacional  $\chi\eta$  y  $\psi_1$  ya que estos controlan el proceso de consolidación). Stipho (1978) y Sheu (1984) presentan en sus estudios las características de estas arcillas y además de ello ensayan el material en una cámara triaxial, consolidando de manera isotrópica y anisotrópica diferentes muestras de esta arcilla. A partir de la información presentada por Stipho (1978) y Sheu (1984) se simula el comportamiento de las arcillas mencionadas. Se toman directamente los valores de los parámetros de estado crítico ( $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $M_c$ ,  $M_e$  y  $\nu$ ) que ellos reportan y los datos experimentales del ensayo de corte triaxial isotrópico y anisotrópico.

### 5.1. Parámetro de forma $R$

Como previamente se ha mencionado,  $R$  es un parámetro adimensional del modelo que controla la forma elíptica de la superficie de frontera. Este parámetro tiene una incidencia particular en la simulación de suelos normalmente consolidados, es decir suelos con  $OCR = 1,0$ ,

y por tanto su calibración debe ser realizada sobre datos experimentales de este tipo.

Cuando el valor  $R$  aumenta, desde un valor determinado, se presenta una disminución de la resistencia que el material puede alcanzar por lo que en las trayectorias de esfuerzos y la curva esfuerzo–deformación se alcanzan menores esfuerzos desviadores o de corte a la falla tanto en compresión como en extensión triaxial, adicionalmente, el efecto que produce un valor mayor de  $R$  en la presión de poros es su disminución en compresión y su aumento en extensión.

Cuando el valor  $R$  disminuye se presentará el efecto contrario del aumento de  $R$  en el comportamiento mecánico del material por lo que se alcanzarán esfuerzos de falla mayores, presiones de poros en compresión mayores y presiones de poros menores en extensión.

Finalmente, es de resaltar la sensibilidad moderada de este parámetro ya que el comportamiento del modelo responde de una manera adecuada a la relación entre resistencia y presión de poros que se presenta de manera experimental, en la que si el material alcanza grandes esfuerzos se presentará una mayor presión de poros por las condiciones no drenadas del ensayo en las que el agua del suelo también asume parte de la carga.

Lo descrito anteriormente se puede evidenciar a través de las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 en las que se aprecia el efecto de la variación de  $R$  en las trayectorias de esfuerzo, la curva esfuerzo–deformación y la curva presión de poros–deformación respectivamente.

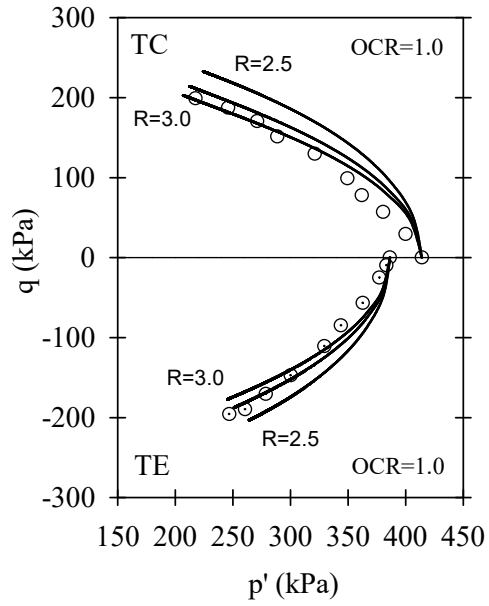


Figura 5.1: Efecto de la variación de  $R$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.

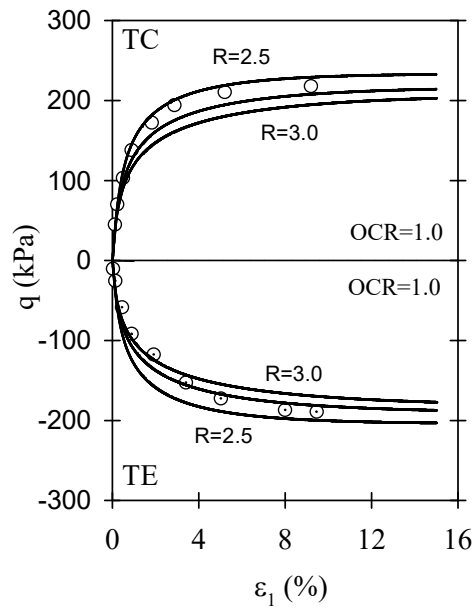


Figura 5.2: Efecto de la variación de  $R$  en la curva esfuerzo – deformación axial.



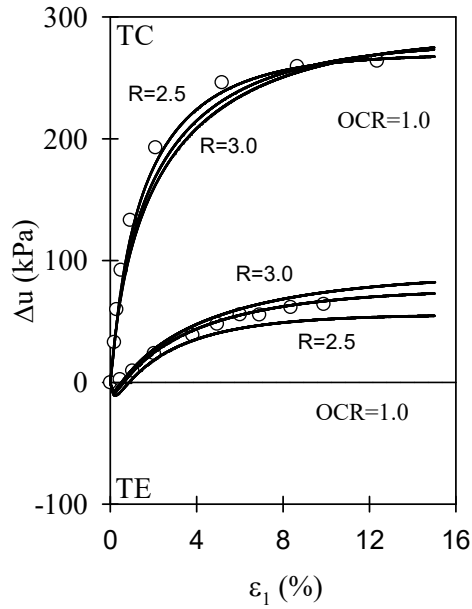


Figura 5.3: Efecto de la variación de  $R$  en la curva presión de poros – deformación axial.

## 5.2. Parámetro de centro de proyección $C$

En el GBSM, el parámetro  $C$  define la localización del centro de proyección que empleará la regla de mapeo radial (*radial mapping rule*) en el plano de invariantes de esfuerzos  $I$ - $J$ . Este parámetro tiene incidencia para cualquier  $OCR$ , por lo cual su calibración se debe realizar sobre datos experimentales que comprendan diferentes relaciones de sobre-consolidación, es decir, diferentes  $OCR$ 's.

Cuando el valor  $C$  aumenta, desde un valor determinado, se presenta una disminución de la rigidez inicial que el material puede tener. Es por esto que en las trayectorias de esfuerzos y la curva esfuerzo-deformación en compresión y extensión se observa un comportamiento mucho más plástico que elástico representado por una menor verticalidad inicial en las trayectorias de esfuerzos y curva esfuerzo-deformación.

Cuando el valor  $C$  disminuye se presentará el efecto contrario a su aumento, presentándose un incremento en la rigidez inicial del material y por tanto una mayor verticalidad inicial en las trayectorias de esfuerzos y curva esfuerzo-deformación tanto en compresión como en extensión.

Por último, se resalta que este parámetro genera una afectación la baja en las trayectorias de esfuerzos, curva esfuerzo–deformación y principalmente en el comportamiento de la presión de poros.

Lo descrito anteriormente se puede evidenciar a través de las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 en las que se aprecia el efecto de la variación de  $C$  en las trayectorias de esfuerzo, la curva esfuerzo–deformación y la curva presión de poros–deformación respectivamente.

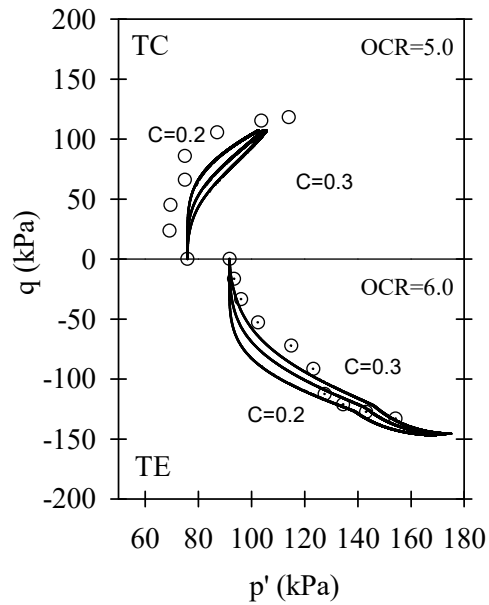


Figura 5.4: Efecto de la variación de  $C$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.

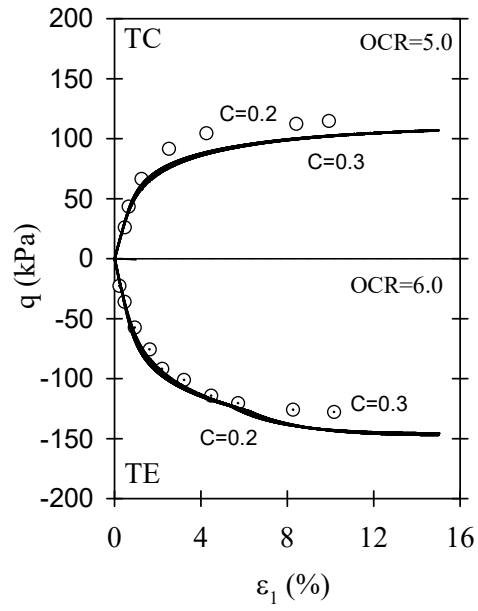


Figura 5.5: Efecto de la variación de  $C$  en la curva esfuerzo – deformación axial.

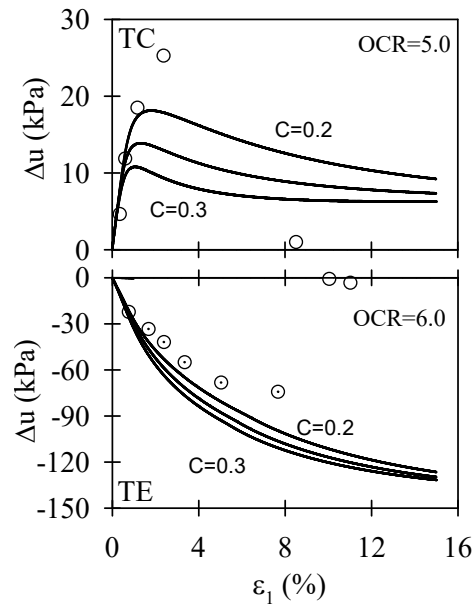


Figura 5.6: Efecto de la variación de  $C$  en la curva presión de poros – deformación axial.

### 5.3. Parámetro de núcleo elástico $s_p$

El parámetro de núcleo elástico  $s_p$  esta asociado al comportamiento elástico inicial que simula el modelo cuando el suelo es cargado y por tanto es el encargado de retardar o determinar el inicio del comportamiento inelástico dentro de la superficie de frontera.

Valores de  $s_p$  mayores a 1.0 generarán un crecimiento del núcleo elástico y por lo que se retardará la aparición de deformaciones plásticas dentro de la superficie de frontera. Si el valor de  $s_p$  es aumentado, las trayectorias de esfuerzos que seguirá el material serán cada vez mas verticales y mas largas en su verticalidad, presentándose un incremento en la rigidez y presión de poros en las curvas esfuerzo–deformación y presión de poros–deformación respectivamente.

Si el valor de  $s_p$  es igual a 1.0, las deformaciones plásticas se presentarán inmediatamente sobre la superficie de frontera.

Es importante mencionar que  $s_p$  afecta de igual manera el comportamiento del suelo tanto en compresión como en extensión y que su variación se ve únicamente reflejada en suelos sobreconsolidados ( $OCR > 1.0$ ) que por su naturaleza presentan mayor rigidez inicial de que los suelos normalmente consolidados ( $OCR = 1.0$ ).

La variación de la respuesta mecánica del suelo, conforme  $s_p$  toma diferentes valores, se presenta en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 para muestras de suelo sobreconsolidadas. En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se aprecia la variación nula de la respuesta del suelo cuando  $s_p$  toma diferentes valores para muestras de suelo normalmente consolidadas..

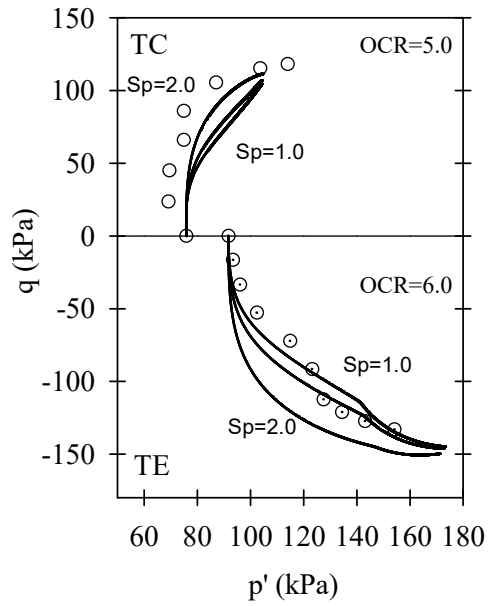


Figura 5.7: Efecto de la variación de  $s_p$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas para  $OCR > 1$ .

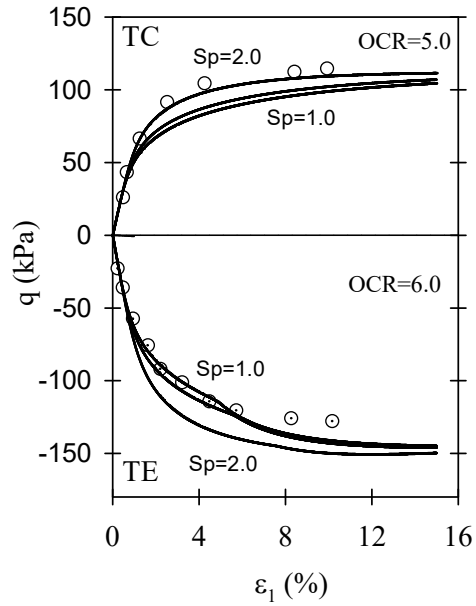


Figura 5.8: Efecto de la variación de  $s_p$  en la curva esfuerzo – deformación axial para  $OCR > 1$ .

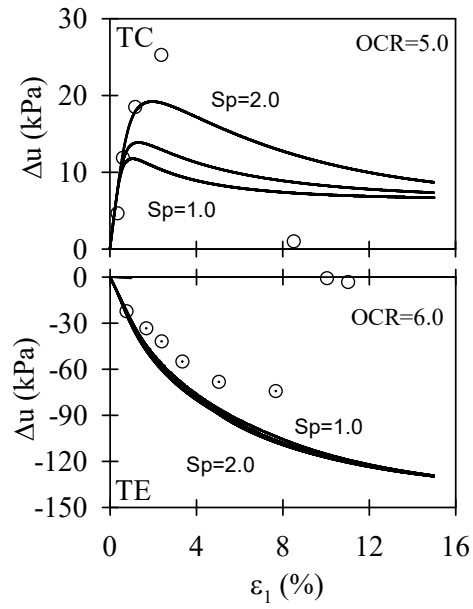


Figura 5.9: Efecto de la variación de  $s_p$  en la curva presión de poros – deformación axial para  $OCR > 1$ .

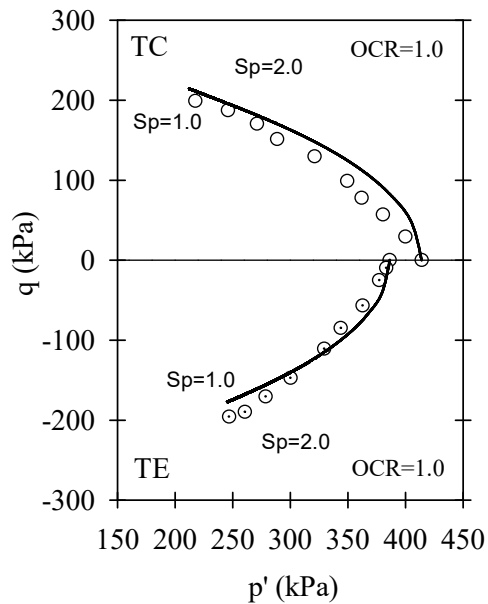


Figura 5.10: Efecto de la variación de  $s_p$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas para  $OCR = 1$ .

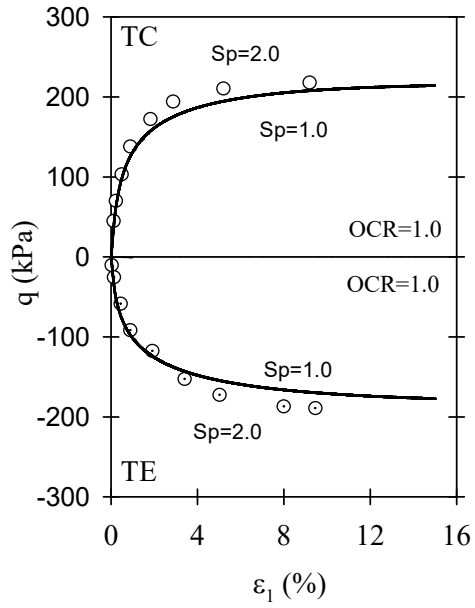


Figura 5.11: Efecto de la variación de  $s_p$  en la curva esfuerzo – deformación axial para  $OCR = 1$ .

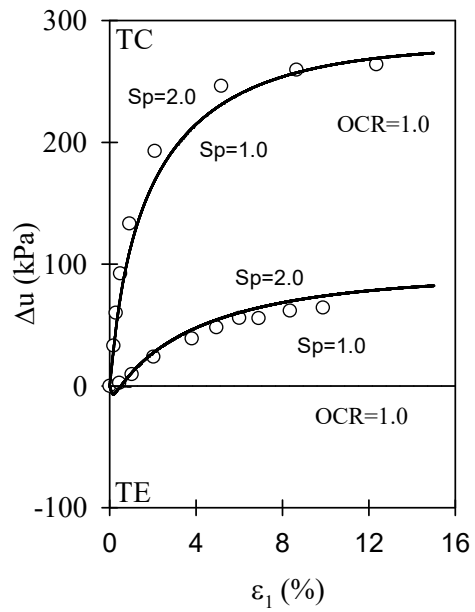


Figura 5.12: Efecto de la variación de  $s_p$  en la curva presión de poros – deformación axial para  $OCR = 1$ .

## 5.4. Parámetros de endurecimiento plástico $a$ y $h_c$ , $h_e$

En el GBSM el parámetro  $a$  está asociado, así como el parámetro  $s_p$ , al núcleo elástico y al inicio de deformaciones plásticas dentro de la superficie de frontera.

La variación de este parámetro tiene el mismo efecto de la variación de  $s_p$  y a la vez su mismo comportamiento, sin embargo,  $a$  puede simular comportamiento plástico para estados de esfuerzos menores a los que  $s_p$  permite y adicionalmente simular una rigidez mayor, prolongada y mas pronunciada.

Los diferentes comportamientos que se producen con la variación de  $a$  se presentan en las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15.

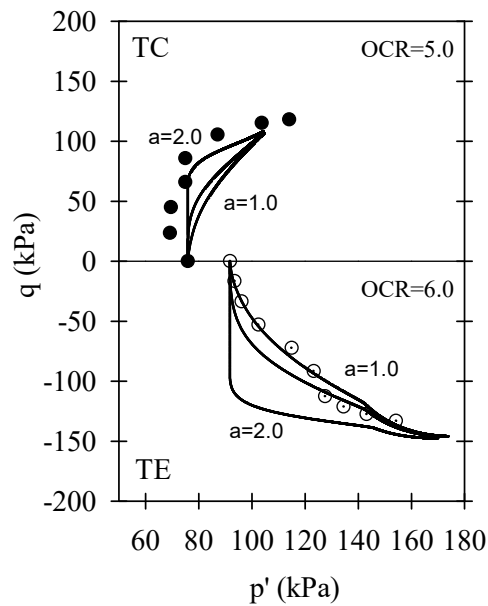


Figura 5.13: Efecto de la variación de  $a$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.



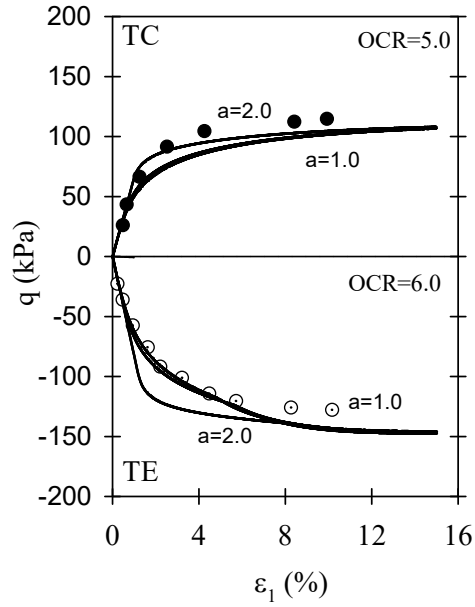


Figura 5.14: Efecto de la variación de  $a$  en la curva esfuerzo – deformación axial.

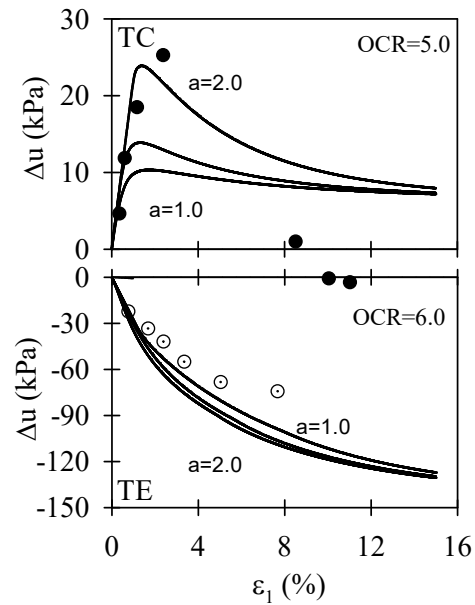


Figura 5.15: Efecto de la variación de  $a$  en la curva presión de poros – deformación axial.

El parámetro  $h_c$  está asociado al endurecimiento plástico que se presenta en compresión. Incrementos de su valor generarán como respuesta un incremento en el esfuerzo último que puede alcanzar el suelo antes de la falla y un incremento en la presión de poros del suelo

en compresión. Valores menores producirán el efecto contrario a su incremento generando menores presiones de poros y un menor esfuerzo ultimo antes de la falla.

La respuesta de  $h_c$  cuando adquiere diferentes valores se presenta en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.

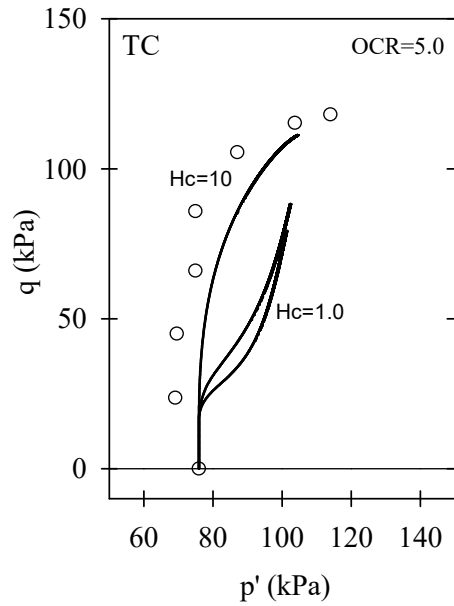


Figura 5.16: Efecto de la variación de  $h_c$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.

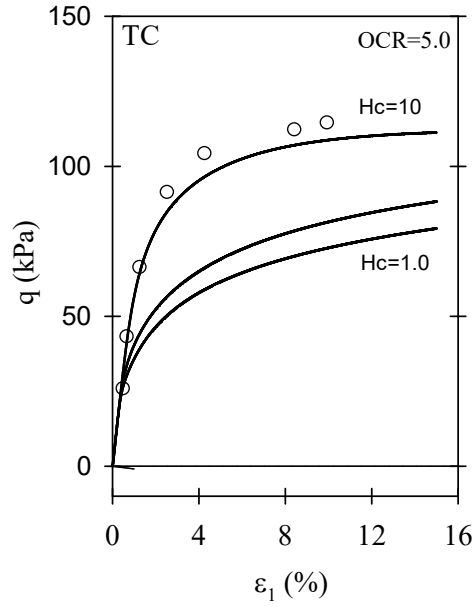


Figura 5.17: Efecto de la variación de  $h_c$  en la curva esfuerzo – deformación axial.

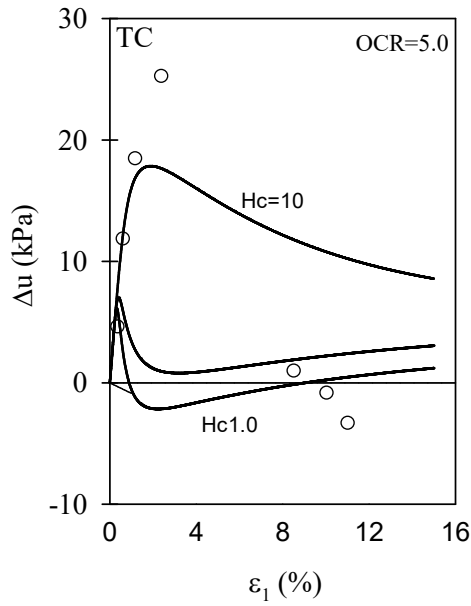


Figura 5.18: Efecto de la variación de  $h_c$  en la curva presión de poros – deformación axial.

El parámetro  $h_e$  está asociado al endurecimiento plástico que se presenta en extensión. Incrementos de su valor generan en la curva esfuerzo–deformación que la simulación alcance un estado de esfuerzos menor antes de la falla, que no afecta de manera apreciable la presión

de poros. Si el valor de  $h_e$  adquiere valores menores se producirá el efecto contrario al de su aumento en la curva esfuerzo–deformación, en donde el esfuerzo último antes de la falla se incrementará, y nuevamente esto no afectará de manera apreciable la presión de poros.

En las Figuras 5.19, 5.20 y 5.21 se presenta el efecto que tiene la variación de  $h_e$  en las trayectorias de esfuerzo, la curva esfuerzo–deformación y la curva presión de poros–deformación respectivamente.

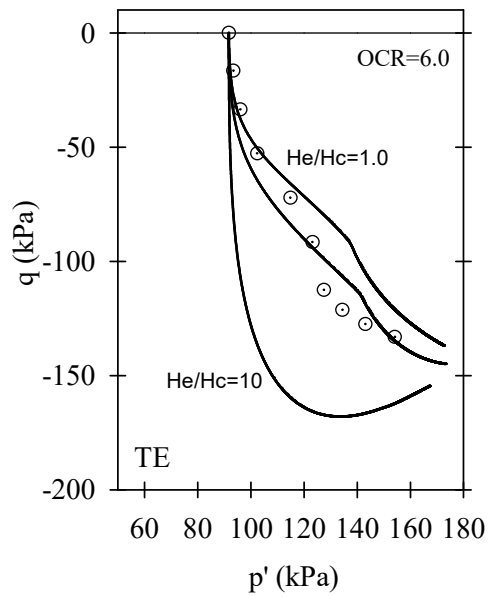


Figura 5.19: Efecto de la variación de  $h_e$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.

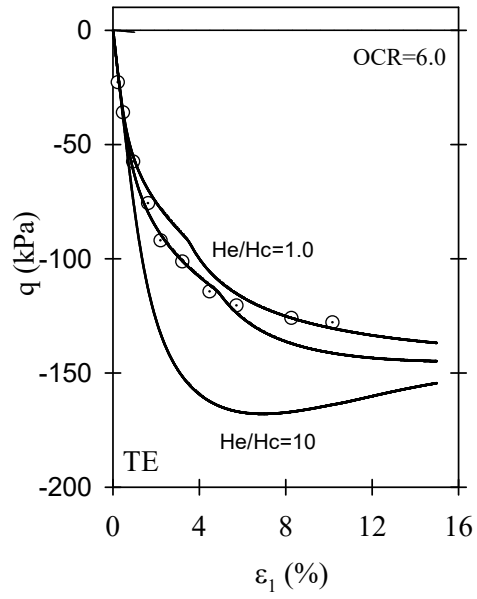


Figura 5.20: Efecto de la variación de  $h_e$  en la curva esfuerzo – deformación axial.

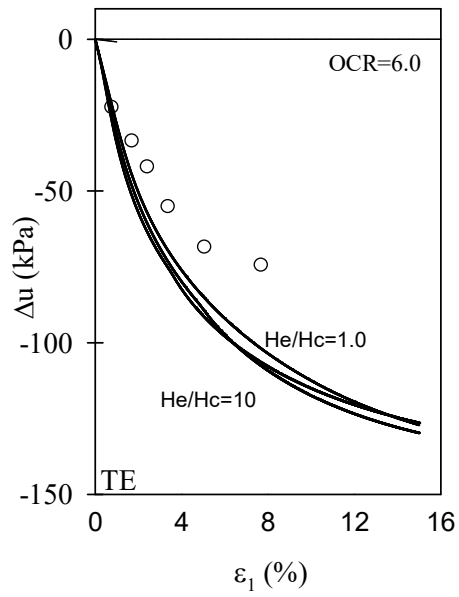


Figura 5.21: Efecto de la variación de  $h_e$  en la curva presión de poros – deformación axial.

## 5.5. Parámetro de endurecimiento rotacional $\psi_2$

El parámetro de endurecimiento rotacional  $\psi_2$  está asociado a la simulación del comportamiento anisotrópico del material, y es uno de los encargados de controlar el endurecimiento dado por la rotación de la superficie de frontera y controlar la respuesta del material en extensión. Por lo cual, al realizar simulaciones numéricas su incidencia se ve reflejada en todas las curvas de comportamiento mecánico; trayectorias de esfuerzos, esfuerzo–deformación y presión de poros.

Cuando el valor de  $\psi_2$  es incrementado, el estado de esfuerzos  $p$ - $q$  en extensión al que llegan las trayectorias de esfuerzo son sustancialmente mayores (particularmente al final de las trayectorias de esfuerzos) generando de esta manera un incremento importante del esfuerzo último de la curva esfuerzo–deformación y un incremento nuevamente apreciable en la respuesta de la presión de poros. Si el valor de  $\psi_2$  es disminuido el estado de esfuerzos  $p$ - $q$  al que llegará el material en extensión será menor y por tanto se presentará una disminución en las presiones de poros y en el esfuerzo último en la curva esfuerzo–deformación.

Lo descrito anteriormente se muestra en las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 en las que se aprecia el efecto de la variación de  $\chi_\eta$  en las trayectorias de esfuerzo, la curva esfuerzo–deformación y la curva presión de poros–deformación respectivamente.

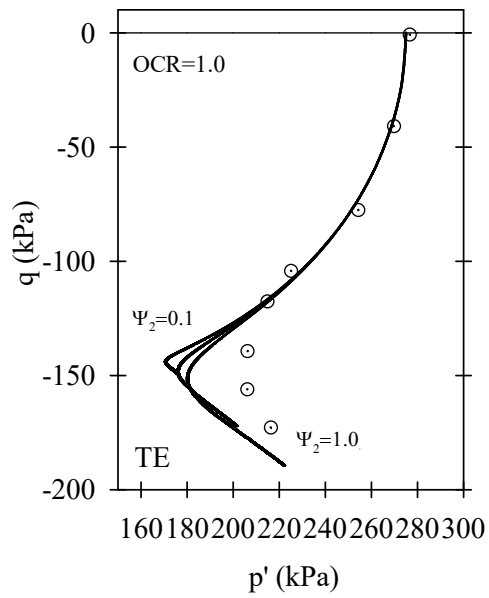


Figura 5.22: Efecto de la variación de  $\psi_2$  en las trayectorias de esfuerzos no drenadas.

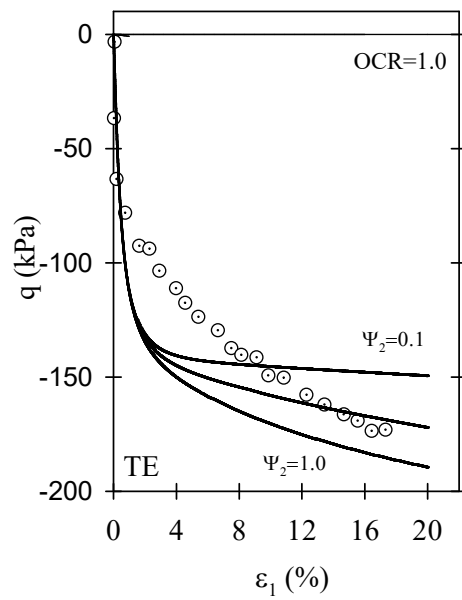


Figura 5.23: Efecto de la variación de  $\psi_2$  en la curva esfuerzo – deformación axial.

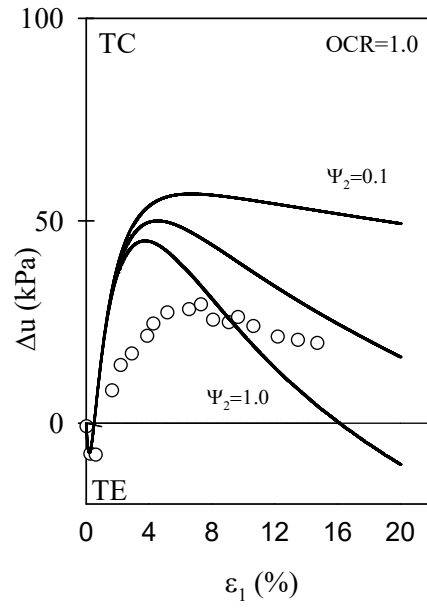


Figura 5.24: Efecto de la variación de  $\psi_2$  en la curva presión de poros – deformación axial.



# Capítulo 6

## Desempeño del modelo *GBSM*

En este capítulo se presentan las simulaciones de ensayos triaxiales consolidados no drenados de diferentes suelos cohesivos empleando el modelo *GBSM*, y realizando las simulaciones a esfuerzo controlado.

Adicionalmente, en la Tabla 6.1 se muestran los parámetros usados para las simulaciones. Los parámetros asociados al estado crítico fueron obtenidos a partir de recopilación de bibliográfica, y los demás parámetros fueron obtenidos mediante calibración.

Tabla 6.1: Parámetros del modelo empleados en las simulaciones numéricas

Parámetros	Georgia Kaolin	Kaolin Parry	TSC*	BBC**	LCT***
Estado crítico					
$\lambda$	0.012	0.330	0.170	0.160	0.666
$\kappa$	0.035	0.061	0.020	0.012	0.0077
$\nu$	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29
$M_c$	0.87	0.88	1.05	1.35	1.18
$M_e$	0.84	0.63	0.95	0.93	0.86
Superficie de frontera					
$R$	2.00	2.60	2.50	2.20	2.20
$C$	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
$S_p$	2.00	1.80	1.00	2.00	2.00
$h_c$	5.0	8.0	5.0	5.0	5.0
$h_e$	5.0	12.0	25.0	50.0	50.0
$a$	2.00	1.20	1.50	2.50	2.50
Potencial plástico					
$N_c$	-	-	-	1.0	0.96
$N_e$	-	-	-	1.28	1.20
Endurecimiento rotacional					
$\chi_\eta$	1.00	400.00	-	300.00	300.00
$\psi_1$	0.50	3.00	-	0.00	5.00
$\psi_2$	2.50	200.00	-	2.50	2.50

\*Taipei Silty Clay (TSC).

\*\* Boston Blue Clay (BBC).

\*\*\* Lower Cromer Till (LCT).

Los datos experimentales de Georgia Kaolin se obtuvieron a partir del trabajo realizado por Sheu (1984) en el que hizo ensayos de comportamiento cíclico, para esto realizo una ca-

racterización del material a partir de ensayos triaxiales no drenados consolidados de manera isotrópica. Para este suelo, se usaron los datos experimentales isotrópicos presentados por el autor y se realizaron simulaciones isotrópicas y anisotrópicas para mostrar las capacidades predictivas del modelo GBSM en este suelo. Las Figuras 6.1 y 6.2 permiten evaluar el desempeño del modelo.

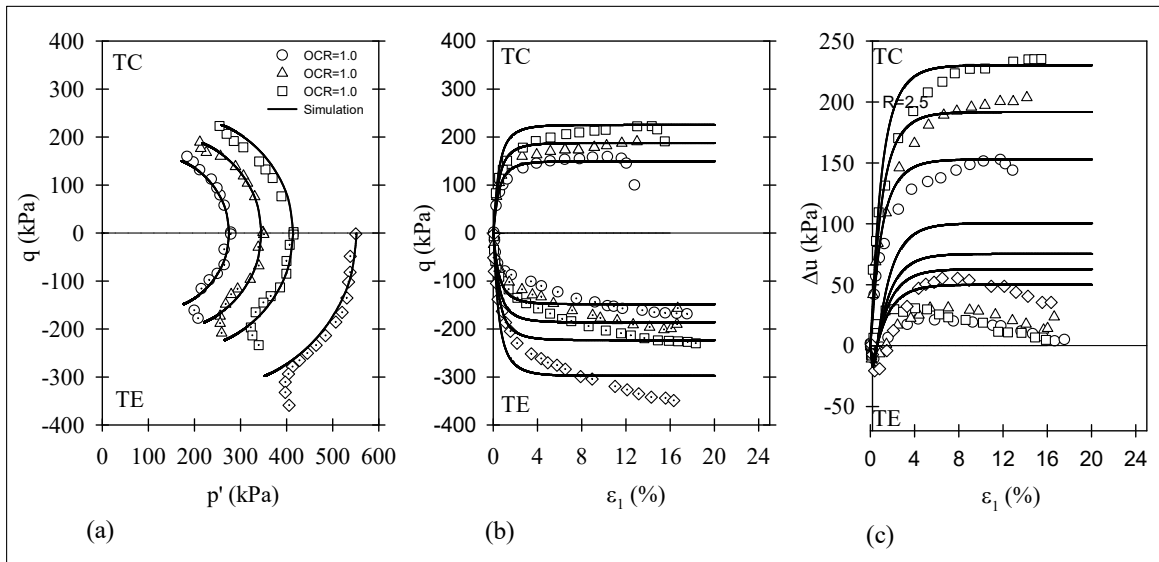


Figura 6.1: Simulaciones numéricas isotrópicas asociadas de la arcilla Georgia Kaolin: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Sheu, 1984)

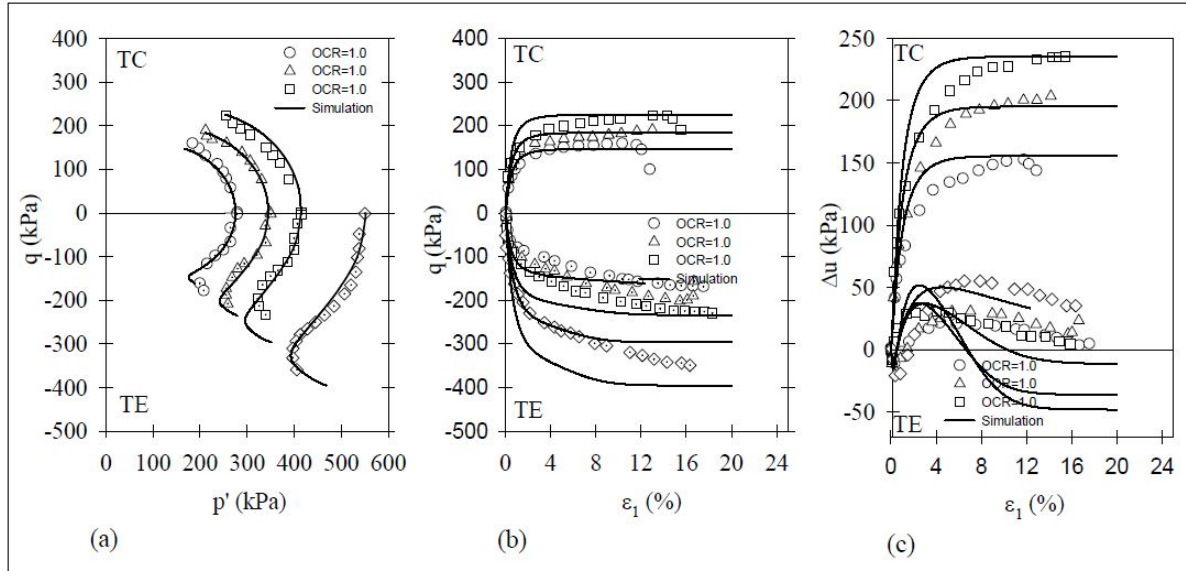


Figura 6.2: Simulaciones numéricas anisotrópicas asociadas de la arcilla Georgia Kaolin: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Sheu, 1984)

Como se mencionó anteriormente, la arcilla Georgia Kaolin fue ensayada al corte en aparato triaxial consolidándose de manera isotrópica para obtener únicamente muestras normalmente consolidadas ( $OCR = 1,0$ ) a diferentes niveles de esfuerzos. Se aprecia en la Figura 6.1 que la simulación del modelo isotrópico con regla de flujo asociada, no logra representar de manera adecuada el ablandamiento que se produce al final del ensayo en extensión. Para representar de manera adecuada dicho comportamiento al final del ensayo se realiza una simulación con la versión anisotrópica asociada del GBSM, usando los mismos parámetros con los que se calibró el modelo isotrópico asociado, con cual solo se incluyeron y estimaron los parámetros de anisotropía ( $\chi_\eta, \psi_1, \psi_2$ ) como se evidencia en la Tabla 6.1.

En la Figura 6.2 se muestran las simulaciones empleando el modelo anisotrópico asociado, el cual permite aproximarse de una mejor manera a el comportamiento real del suelo, mostrando una adecuada la predicción de las trayectorias de este. Sin embargo, es preciso señalar algunas limitaciones que presenta el modelo en la simulación de este suelo, siendo una sobre estimación de la capacidad del suelo que se presenta de manera leve en compresión y de manera apreciable en extensión y una predicción errada de del exceso de presión de poros

cuando esta está por debajo de los 50 *KPa*.

Los ensayos experimentales para el suelo Kaolin Parry se tomaron del trabajo realizado por Parry and Nadarajah (1973), los autores realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados isotrópicos y anisotrópicos a diferentes grados de sobreconsolidación, en compresión y extensión.

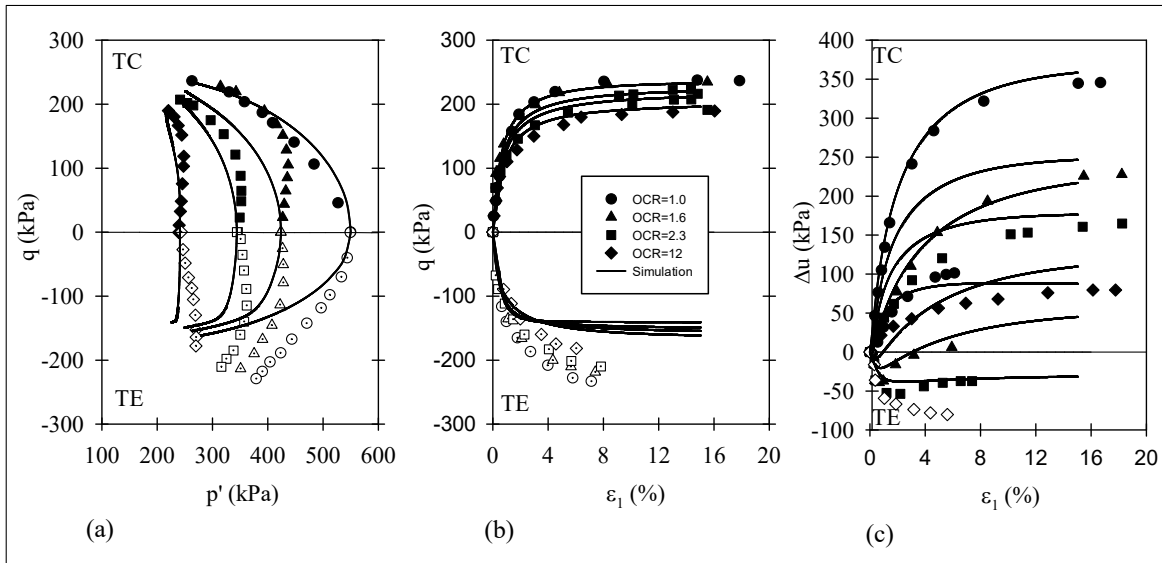


Figura 6.3: Simulaciones numéricas isotrópicas asociadas de la arcilla Kaolin Parry: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Parry and Nadarajah, 1973)

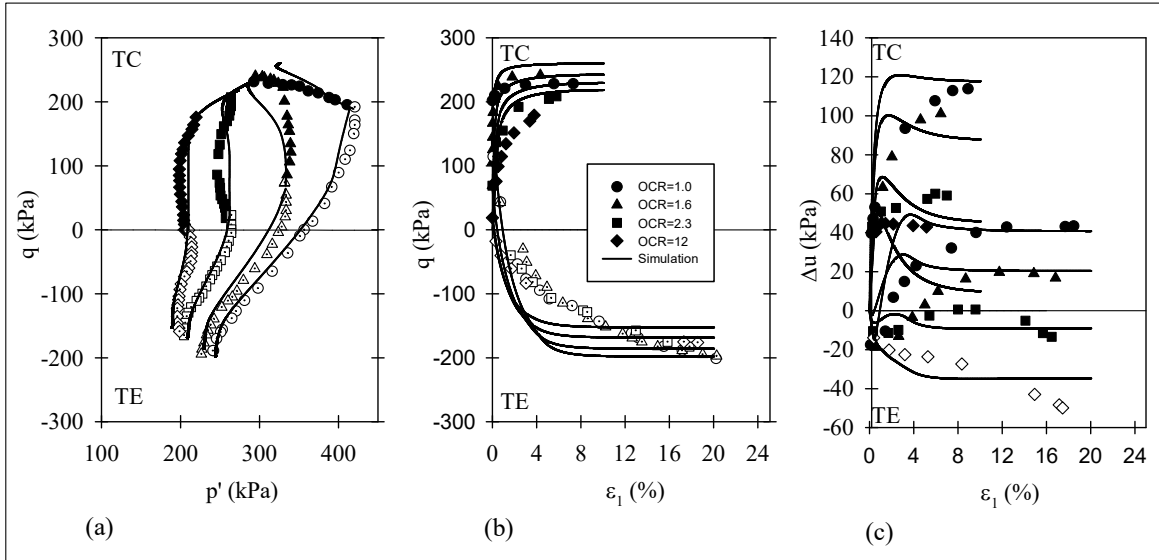


Figura 6.4: Simulaciones numéricas anisótropas asociadas de la arcilla Kaolin Parry: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Parry and Nadarajah, 1973)

En la Figura 6.3 se observa en compresión una buena respuesta del modelo al simular de manera acertada las trayectorias de esfuerzos, curva esfuerzo–deformación y curva presión de poros– deformación, por otra parte, en extensión el modelo no es capaz de representar de manera adecuada el comportamiento del suelo al subestimar las capacidades del material. Este comportamiento errado en extensión es causado por la regla de flujo asociada que emplea la version del modelo utilizado, en la que la superficie que delimita deformaciones plásticas y elásticas es la misma empleada como superficie de potencial plástico.

En cuanto al desempeño del modelo en la simulación de este suelo en condiciones de consolidación anisotrópica el modelo representa de manera adecuada las trayectorias de esfuerzo que sigue el material tanto en compresión como en extensión, sin embargo, se observa que el modelo en la curva esfuerzo–deformación tiene un comportamiento poco preciso debido a que predice una rigidez inicial mucho mayor a la que posee el suelo y por tanto al comienzo de dicha curva, en compresión y particularmente en extensión, las predicciones se alejan de los datos experimentales hasta casi la mitad del ensayo en donde el modelo si representa de manera adecuada dicho comportamiento.

Para la simulación numérica de la arcilla limosa TSC (Taipei Silty Clay) se toma directamente la información experimental reportada por los autores Chin and Liu (1997) al estudiar este suelo. A continuación en la Figura 6.5 se muestran las simulaciones isotrópicas asociadas realizadas para este suelo.

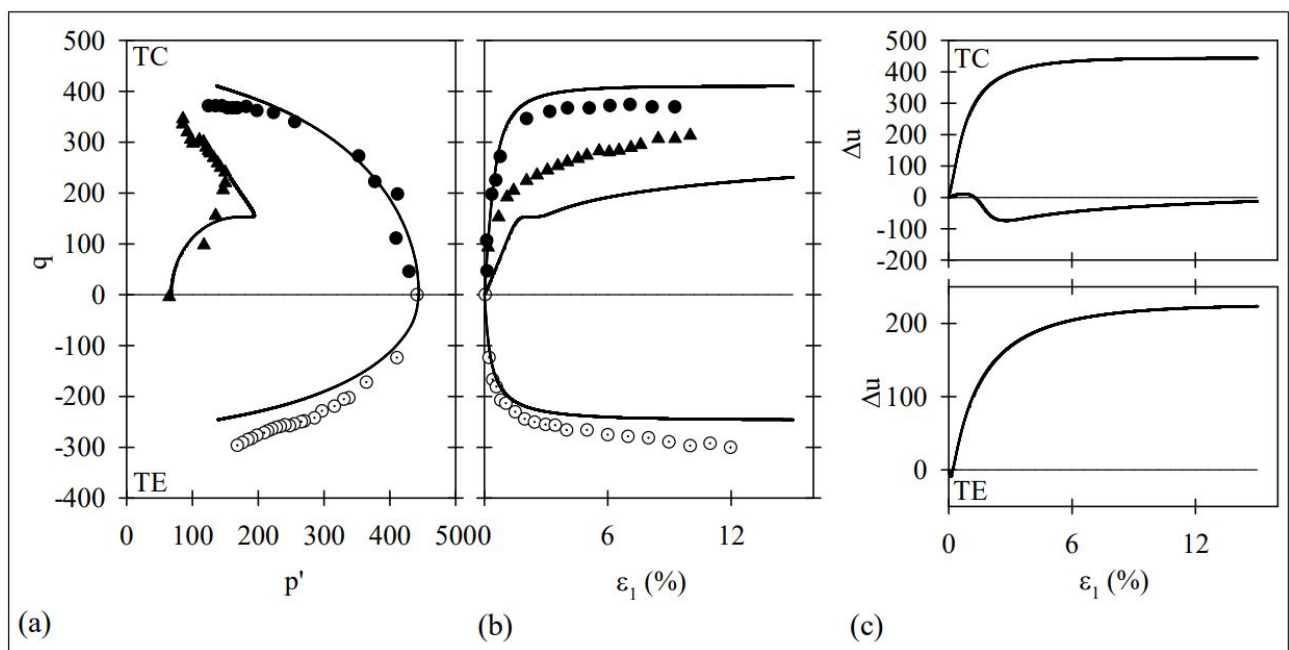


Figura 6.5: Simulaciones numéricas isotrópicas asociadas de la arcilla TSP: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Chin and Liu, 1997)

De acuerdo a las simulaciones realizadas mostradas en la Figura 6.5 se observa un buen desempeño del modelo al simular de manera adecuada las trayectorias de esfuerzo que siguen las muestras de suelo ensayadas en compresión. Por otra parte se observa un desempeño menos preciso y acertado en las trayectorias de esfuerzo en extensión y curvas esfuerzo–deformación. En las curva esfuerzo–deformación el comportamiento del modelo sobre estima la capacidad de las muestras de suelo normalmente consolidadas y subestima la capacidad de las muestras sobreconsolidadas .

La arcilla marina BBC (Boston Blue Clay) fue estudiada por diversos autores entre ellos

Fayad (1986). Este autor presenta información experimental de ensayos triaxiales isotrópicos y anisotrópicos a diferentes grados de sobreconsolidación. De estos ensayos en compresión y extensión, se obtienen los datos necesarios para realizar las simulaciones que se presentan a continuación.

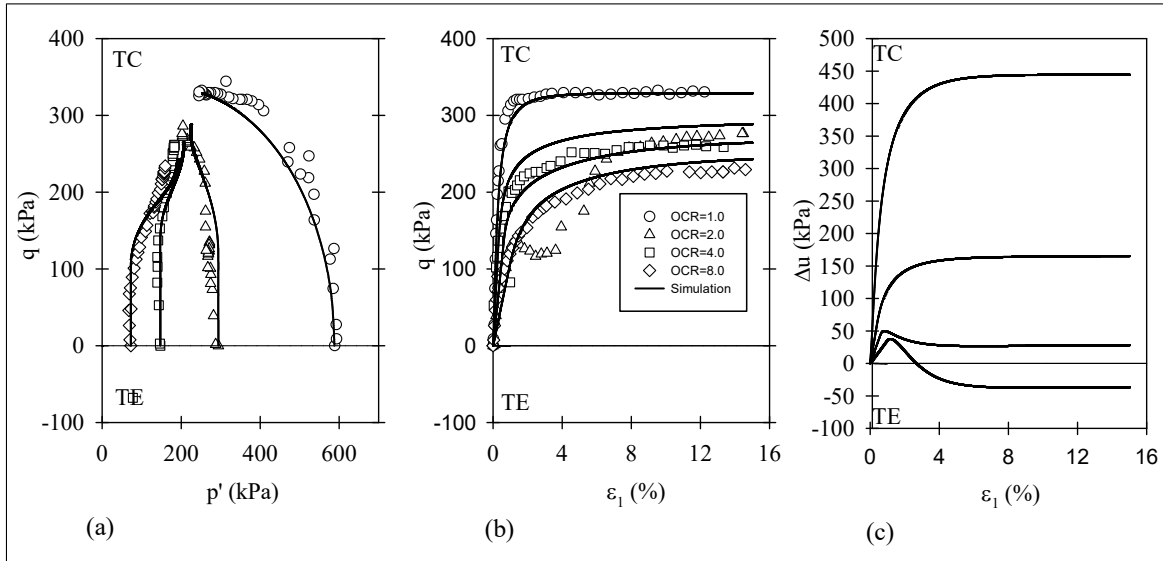


Figura 6.6: Simulaciones numéricas isotrópicas asociadas de la arcilla BBC: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Fayad, 1986)



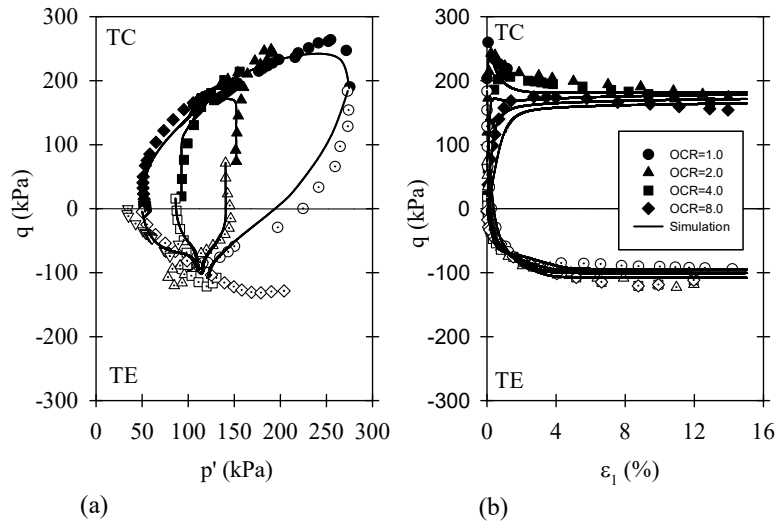


Figura 6.7: Simulaciones numéricas anisotrópicas no-asociadas de la arcilla BBC: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Fayad, 1986)

En las simulaciones realizadas para esta arcilla (Figuras 6.6 y 6.7) se observa un desempeño del modelo bastante adecuado, tanto en las simulaciones isotrópicas como anisotrópicas, debido a que las simulaciones concuerdan en una buena medida con los datos experimentales de las trayectorias de esfuerzo y curva esfuerzo–deformación. Es de resaltar que el modelo subestima las características de las muestras de material normalmente consolidado ( $OCR = 1,0$ ).

La información experimental del suelo LCT (Lower Cromer Till) es obtenida del trabajo hecho por Gens (1982), para este caso solo se simuló ensayos anisotrópicos con diferentes relaciones de sobreconsolidación. Dichas simulaciones se presentan a continuación en la Figura 6.8.

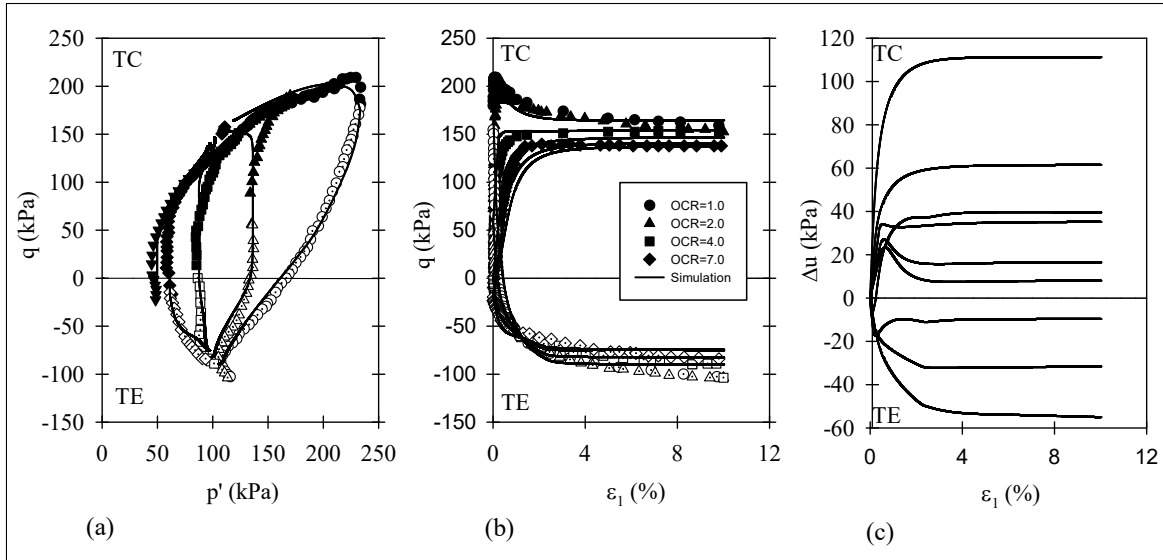


Figura 6.8: Simulaciones numéricas anisotrópicas no–asociadas de la arcilla LCT: Trayectorias de esfuerzos efectivos, Curva esfuerzo – deformación y Curva exceso de presión de poros – deformación. (Gens, 1982)

Se observa en las simulaciones que el modelo predice de manera adecuada el comportamiento real del suelo al concordar de manera precisa los datos experimentales con las simulaciones. Se resalta que en estas simulaciones no se presenta ningún comportamiento errado del modelo con respecto a la respuesta del suelo de manera experimental.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se presentó de manera general la teoría de la elasto plasticidad clásica y la teoría de la elastoplasticidad basada en el concepto del Bounding Surface. Adicionalmente se mostró de manera detallada el modelo constitutivo para suelos cohesivos *Generalized Bounding Surface Model* (GBSM) junto con un estudio paramétrico de sus versiones *isotrópica asociada* y *anisotrópica asociada*. De acuerdo con lo anterior y con los resultados obtenidos se dan las siguientes conclusiones.

- Se presentan las gráficas comparativas entre ensayos experimentales y simulaciones, observando que el modelo funciona de manera adecuada, siguiendo la respectiva calibración de los parámetros necesarios, las simulaciones predicen las trayectorias de esfuerzos de manera similar que el ensayo experimental.
- Se simuló el comportamiento de un total de cinco suelos cohesivos consolidados isotrópicamente y anisotrópicamente. Las arcillas Georgia Kaolin, Kaolin Parry, Taipei Silty Clay y Boston Blue Clay fueron consolidadas isotrópicamente, y de manera anisotrópica fueron consolidadas las arcillas Georgia Kaolin, Kaolin Parry Boston Blue Clay y Lower Cromer Till.
- El estudio paramétrico realizado para los parámetros  $R$ ,  $C$ ,  $s_p$ ,  $a$ ,  $h_c$ ,  $h_e$  y  $\psi_2$  que componen el modelo GBSM y que muestra el comportamiento de estos, esto, de acuerdo con la función que cumplen en el modelo y las variaciones en los valores de calibración.

- Se establece un rango de valores recomendados para iniciar la parametrización, en lo que se evidencia de forma clara la variación que tiene cada parámetro, según el valor numérico.

Tabla 7.1: Rango de valores recomendados para la calibración de los parámetros asociados al GBSM

Parámetro	Valor típico	Rango de valores
Superficie de frontera		
$R$	2.80	2.50-3.00
$C$	0.25	0.20-0.30
$S_p$	1.60	1.00-2.00
$h_c$	3.00	1.00-10.00
$h_e/h_c$	5.00	1.00-10.00
$a$	1.50	1.00-2.00
Endurecimiento rotacional		
$\psi_2$	0.50	0.10-1.00

- Se evaluó el desempeño del modelo constitutivo GBSM, obteniendo las gráficas comparativas entre ensayos experimentales y simulaciones, donde se observa que el modelo funciona de manera adecuada, y las simulaciones predicen las trayectorias de esfuerzos de manera similar que el ensayo experimental.
- Se observó que el GBSM mejora diferentes aspectos de otros modelos constitutivos propuestos a lo largo de la historia. Destacando la capacidad de este para realizar simulaciones acertadas de suelos sobreconsolidados ( $OCR > 1.0$ ) sometidos a ensayos en compresión y extensión, tener en cuenta características anisotrópicas iniciales del material, su evolución durante el proceso de carga, y predecir el comportamiento de la presión de poros en el proceso de carga.
- Cada uno de los parámetros asociados a la configuración de la forma de la superficie de frontera ( $R$  y  $C$ ), al endurecimiento plástico ( $s_p$ ,  $a$ ,  $h_c$  y  $h_e$ ) y al endurecimiento

rotacional ( $\psi_2$ ) controlan y representan determinada característica mecánica del suelo que se manifiesta en las trayectorias de esfuerzos, la curva esfuerzo–deformación y en la curva presión de poros–deformación.

## 7.1. Recomendaciones para futuras investigaciones

Una vez concluida la tesis, se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con el GBSM y se propone:

- Extender los estudios expuestos en esta tesis evaluando el comportamiento del GBSM usando regla de flujo no asociada, siendo este la simulación mas completa y que mejora la predicción del comportamiento del suelo.
- Hacer “simulaciones verdaderas”, donde se calibren los parámetros generales para una OCR intermedio y si cambiar los parámetros se realicen simulaciones a los demás OCR, esto mismo se podría hacer para ensayos experimentales con diferentes niveles de anisotropía.
- Extender los estudios y simulaciones del GBSM expuestos en esta tesis, a cargas cíclicas, donde se pueda tener la calibración de parámetros iniciales y complemente con el numero de ciclos.

# Bibliografía

- Anandarajah, A. and Dafalias, Y. F. (1986). Bounding surface plasticity iii: application to anisotropic cohesive soils. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 112(12):1292–1318.
- Atkinson, J. (1982). *The mechanics of soil an introduction to critical state*. MacGraw Hill.
- Chin, L. and Liu, C. (1997). Volumetric and undrained behaviors of taipei silty clay. *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 9(4):665–678.
- Dafalias, Y. and Popov, E. (1975). A model of nonlinearly hardening materials for complex loading. *Acta Mechanica*, 21(3):173–192.
- Dafalias, Y. F. (1986). An anisotropic critical state soil plasticity model. *Mechanics research communications*, 13(6).
- Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R. (1980). A bounding surface soil plasticity model. In Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C., editors, *Proceedings of the International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, UK, Balkema, Rotterdam.
- Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R. (1982a). Bounding surface formulation of soil plasticity. In Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C., editors, *Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads*, page 253–282, Chichester, UK. J. Wiley and Sons, Inc.
- Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R. (1982b). A generalized bounding surface constitutive model for clays. In Yong, R. N. and Selig, E. T., editors, *Application of Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geotechnical Engineering*, pages 78–95, Hollywood FL, New York. ASCE American Society of Civil Engineers.

- Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R. (1986). Bounding surface plasticity ii: Application to isotropic cohesive soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 112(12):1263–1291.
- Dafalias, Y. F., Herrmann, L. R., and DeNatale, J. S. (1982). The bounding surface plasticity model for isotropic cohesive soils and its application at the grenoble workshop. In Gudehus, G., Darve, F., and Vardoulakis, I., editors, *Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils*, page 273–287, Grenoble, France.
- Fayad, P. H. (1986). Aspects of the volumetric and undrained behavior of boston blue clay. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A.
- Gens, A. (1982). *Stress–strain and strength characteristics of a low plasticity clay*. PhD thesis, Imperial College, London, U.K.
- Helwany, S. (2007). *Applied Soil Mechanics: with ABAQUS Applications*. John Wiley & Sons.
- Jiang, J., Ling, H. I., and Kaliakin, V. N. (2012). An associative and non-associative anisotropic bounding surface model for clay. *Journal of Applied Mechanics*, 79(3):1–10.
- Jiang, J., Ling, H. I., Kaliakin, V. N., Zeng, X., and Hung, C. (2017). Evaluation of an anisotropic elastoplastic–viscoplastic bounding surface model for clays. *Acta Geotechnica*, 12:335–348.
- Kaliakin, V. N. (1992). Calbr8, a simple computer program for assessing the idiosyncrasies of various constitutive models used to characterize soils. Report no, University of Delaware, Newark, DE, U.S.A.
- Kaliakin, V. N. (2014). Details pertaining to bounding surface models for cohesive soils. Report no, University of Delaware, Newark, DE, U.S.A.
- Kaliakin, V. N. and Dafalias, Y. F. (1989). Simplifications to the bounding surface model for cohesive soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 13:91–100.

- Kaliakin, V. N. and Nieto-Leal, A. (2013). Towards a generalized bounding surface model for cohesive soils. *Poromechanics V Proceedings*.
- Ling, H. I., You, D., Kailakin, V. N., and Themelesis, N. J. (2002). Anisotropic elastoplastic bounding surface model for cohesive soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(7):748–758.
- Nieto-Leal, A. (2007). Modelación del comportamiento del suelo utilizando el modelo constitutivo mit s1. Master’s thesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Nieto-Leal, A. (2016). *Generalized bounding surface model for cohesive soils: a novel formulation for monotonic and cyclic loading*. PhD thesis, University of Delaware, Newark, DE, U.S.A.
- Nieto-Leal, A. and Kaliakin, V. N. (2014). Improved shape hardening function for bounding surface model for cohesive soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4):328–337.
- Nieto-Leal, A., Kaliakin, V. N., and Molina R., T. P. (2017). Performance of the generalized bounding surface model: Simulation of cohesive soils subjected to monotonic loading. In *Geocongress 2018*, Florida, Orlando, U.S.A. ASCE American Society of Civil Engineers.
- Parry, R. H. G. and Nadarajah, V. (1973). Observations on laboratory prepared, lightly averconsolidated specimens of kaolin. *Gótecnique*, 24(3):345–358.
- Roscoe, K. and Burland, J. (1968). On the generalized stress-strain behavior of wet clays. *Engineering plasticity*, pages 535–608.
- Schofield, A. and Wroth, C. (1968). *Critical state soil mechanics*. European civil engineering series. McGraw-Hill.
- Sheng, D., Sloan, S., and Yu, H. (2000). Aspects of finite element implementation of critical state models. *Computational Mechanics*, 26:185–196.
- Sheu, W.-Y. (1984). *Modeling of stress–strain–strength behavior of a clay under cyclic loading*. PhD thesis, University of Colorado.



Stipho, A. S. A. (1978). *Experimental and theoretical investigation of the behavior of anisotropically consolidated kaolin*. PhD thesis, University College, Cardiff, U.K.