

## ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Ricardo Schiava<sup>\*</sup>, Guillermo Etse<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Grupo de Mecánica Computacional  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Universidad Nacional de Santiago del Estero, Avda Belgrano (s) 1912, 4200 . Santiago del Estero,  
Argentina  
e-mail: schiava@unse.edu.ar

<sup>†</sup> CEMNCl. Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán, Argentina  
e-mail: getse@herrera.unt.edu.ar

**Palabras clave:** suelos parcialmente saturados, elastoplasticidad, localización de falla.

**Resumen.** *En este trabajo se presenta un análisis del fenómeno de localización en suelos parcialmente saturados, utilizándose un modelo material formulado en el marco de la teoría de medios porosos y la teoría del flujo de la plasticidad. El modelo constitutivo elastoplástico es una extensión del MRS Lade , donde la succión es introducida como componente adicional del estado de tensiones. Consecuentemente, las superficies de fluencia de cono y capa del modelo y variables de endurecimiento y ablandamiento muestran una dependencia de la succión.*

*En primer lugar, se ilustra la capacidad de predicción del modelo constitutivo del comportamiento de suelos parcialmente saturados con contenidos de humedad variable y para distintas condiciones de carga.*

*Finalmente se analiza y discute la condición de bifurcación discontinua en medios porosos parcialmente saturados para diferentes estados tensionales y de succión.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Los suelos son materiales con un comportamiento complejo. Ellos son medios tipo multifase y presentan variación en su estructura tanto en la dirección vertical como horizontal. Tienen un comportamiento marcadamente no lineal, dependiendo del tiempo, de la temperatura, del grado de humedad que contienen y de las características químicas del fluido en sus poros, entre otras. Por lo tanto es importante disponer de modelos conceptuales que puedan predecir el comportamiento bajo condiciones de carga y humedad diferentes e interpretar los ensayos de laboratorio. La principal diferencia entre un suelo parcialmente saturado con otro completamente saturado es la compresibilidad del fluido en los poros. Básicamente el agua que llena los poros del suelo es prácticamente incompresible, volviéndose compresible cuando aparecen burbujas en su interior.

Por debajo del nivel freático los suelos están saturados y la presión de poros es positiva, en cambio por encima de la misma se tienen parcialmente saturados con presiones negativas y la diferencia entre la presión del aire y del agua se denomina “matriz de succión”. La succión en suelos parcialmente saturados es compuesta por dos componentes llamadas succión osmótica y matriz de succión constituyendo ambas la succión total. La succión osmótica es la debida a las sales disueltas en los poros. Primariamente interesa la matriz de succión porque es la que está fuertemente influenciada por los cambios ambientales.

Dentro de los modelos elastoplásticos formulados para suelos parcialmente saturados y basados en ensayos experimentales el modelo de Alonso y otros <sup>[1]</sup> es de los más representativos.

En esos modelos se adoptan dos variables del estado tensional independientes ; la tensión neta ó tensión por encima de la presión atmosférica y la succión. Similares formulaciones han sido propuestas por Scheffler y Bolzon <sup>[2]</sup>, Cui et al <sup>[3]</sup>, Bolsón et al <sup>[4]</sup>, Wheeler y Sivakumar <sup>[5]</sup> y Kohgo <sup>[6]</sup>. Una completa revisión con diferentes propósitos ha sido realizada por Gens <sup>[7]</sup>. Recientemente Khalili <sup>[8]</sup> a formulado un modelo constitutivo basado en tensiones efectivas. En esta formulación del modelo Khalili y Loret incluyen la succión como una variable independiente en las funciones de fluencia y de potencial plástico, en adición con la tensión efectiva y succión dependiendo de los parámetros de endurecimiento.

Sin embargo el análisis de la condición de bifurcación discontinua como forma de localización de falla en la formulación de ecuaciones constitutivas en suelos parcialmente saturados no ha tenido igual consideración. El acoplamiento hidro-mecánico intrínscico en medios porosos parcialmente saturados y la presencia del tensor adicional de succión incide fuertemente en los indicadores de localización de falla. Como consecuencia las direcciones de falla dependen no solamente de las propiedades mecánicas no lineales de la formulación material por ejemplo, ley de fluencia, no asociatividad, ley de evolución de los parámetros de endurecimiento-ablandamiento, etc.; sino también de las componentes hidráulicas de la historia de la deformación.

En este trabajo se aplica un modelo elastoplástico formulado para medios cohesivos friccionales parcialmente saturados <sup>[9]</sup>. Es una extensión del modelo MRS-Lade desarrollado

por Macari, Sture y Runneson<sup>[10]</sup> que es un posterior desarrollo del modelo de tres invariantes propuesto para suelos por Lade. El modelo extendido del MRS-Lade es descrito en el espacio de tres invariantes de tensiones efectivas y en el que se adiciona la succión como variable de tensiones independientes. Las ecuaciones constitutivas del modelo propuesto son analizadas en su capacidad de predicción y en consideración con las soluciones a la bifurcación discontinua, las que son analizadas para diferentes condiciones de presiones y succiones.

Los resultados de este trabajo demuestran el propósito del modelo formulado para predecir el comportamiento de los suelos parcialmente saturados. También se observa la fuerte dependencia con la succión del modo de falla y de la dirección de la dirección crítica de localización .

## 2 TENSIONES CONSTITUTIVAS

Los suelos parcialmente saturados se describen generalmente en función del tensor de tensiones “efectivo” ó “constitutivo”  $\sigma'$  que viene dado por :

$$\sigma' = \sigma - \mathbf{I} p_w = \sigma_n + \mathbf{s} \quad (1)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{I}(p_a - p_w) \quad (2)$$

$$\sigma_n = \sigma - \mathbf{I} p_a \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{s}$  tensor de succión,  $\sigma_n$  tensor de tensiones neto, tensor de tensiones total  $\sigma$ ,  $\mathbf{I}$  es el tensor identidad de segundo orden ,  $p_a$  y  $p_w$  son las presiones de aire y de agua en los poros respectivamente. El término “efectivo” ó “constitutivo” dado al tensor de tensiones es para diferenciarlo del concepto dado por Terzaghi para suelos saturados. En muchos casos geotécnicos prácticos la presión aire en los poros es la misma que la atmosférica y permanece constante por lo que la succión resulta igual a la presión de agua negativa en los poros del suelo.

## 3 LEY DE FLUJO PLASTICO

### 3.1 Formulación general

En varios modelos elastoplásticos , tales como los de Tresca, Mohr-Coulomb y los criterios de fluencia con superficies de cono-capa como el MRSLade<sup>[11]</sup>, dichas superficies límites están definidas por curvas muy tendidas . Cada superficie convexa de función de fluencia,  $F_i \{ \sigma', s, \kappa \}$  en el caso de medios parcialmente saturados está definida en función de la tensión efectiva, la succión y de un conjunto de variables de endurecimiento - ablandamiento  $\kappa$  , donde  $\kappa$  no es un tensor pero representa un arreglo de variables que indica una medida del trabajo plástico ó la deformación plástica desarrollada.

La intersección del conjunto de esfuerzos definidos por  $F_i \leq 0$  define el conjunto convexo

$B \{ \kappa \}$  de tensiones plásticamente admisibles y de succiones.

$$B \{ \kappa \} = \{ \boldsymbol{\sigma}', s \mid F_i \{ \boldsymbol{\sigma}, s, \kappa \} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \} \quad (4)$$

La regla de fluencia se formula en términos del espacio de las subdiferenciales  $\partial F_\lambda$ , representando un conjunto de normales admisibles a las superficies de falla [8].

$$\partial F_\lambda \{ \boldsymbol{\sigma}, \kappa, \boldsymbol{\varepsilon} \} = \{ \boldsymbol{\varepsilon}^p \mid (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}^*) : \boldsymbol{\varepsilon}^p \geq 0, \quad \forall \boldsymbol{\sigma}^* \in B_\lambda \{ \kappa, \boldsymbol{\varepsilon} \} \} \quad (5)$$

Las ecuaciones constitutivas basadas en una regla de fluencia no asociada se expresan por :

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (6)$$

$$(\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{\sigma}'_o) : \mathbf{A} : \boldsymbol{\varepsilon}_p \geq 0, \quad \forall \boldsymbol{\sigma}'_o \in B(\boldsymbol{\varepsilon}, s, \kappa) \quad (7)$$

$$\kappa = h(\boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (8)$$

Donde  $\boldsymbol{\varepsilon}_p$  representa la porción plástica de la tasa del tensor de deformaciones totales  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , La ecuación (7) expresa en general una regla de fluencia no asociada para las deformaciones plásticas y la (8) un conjunto de leyes de endurecimiento que gobiernan la evolución de las variables plásticas.

Para flujo no asociado existe el tensor de transformación  $\mathbf{A}$ , tal que :

$$\mathbf{m}^\sigma = \mathbf{A} : \mathbf{n}^\sigma \quad (9)$$

Con  $n^\sigma = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$  y  $m^\sigma = \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$  gradientes de la función de fluencia y potencial. Para una regla de fluencia asociada se tendrá que  $\mathbf{A} = r \mathbf{I}$ , donde  $\mathbf{I}$  es el tensor identidad de cuarto orden y  $r$  es un escalar<sup>[12]</sup>. La formulación para regla no asociada usando las condiciones de consistencia plástica de Kuhn-Tucker:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \lambda \mathbf{m}^\sigma \quad ; \quad \dot{\lambda} \geq 0 \quad ; \quad F \dot{\lambda} = 0 \quad ; \quad F \leq 0 \quad (10)$$

### 3.2 Condiciones de consistencia

Para el caso de suelos parcialmente saturados la condición de consistencia para carga plástica viene dada por:

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial F}{\partial s} \dot{s} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \dot{\kappa} = 0 \quad (11)$$

$$F = \mathbf{n}_i^\sigma : \boldsymbol{\sigma}' + \mathbf{n}_i^s : \mathbf{s} + r_i \kappa = 0, \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (12)$$

Reemplazando (6) en la ecuación (12) se obtiene la expresión del multiplicador plástico :

$$\lambda_i = \frac{\mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{n}_i^s : \mathbf{s}}{\mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma - r_i h(\mathbf{m}_i^\sigma)} \quad (13)$$

Sustituyendo la ec. (13) en la ecuación constitutiva (12) obtenemos la expresión de la tensión efectiva :

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E} : \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma \otimes \mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E}}{\mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma + H_i} : \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma \otimes \mathbf{n}_i^s}{\mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma + H_i} : \mathbf{s} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{E}_s : \mathbf{s} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{E}_s : I(\dot{p}_a - \dot{p}_w) \quad (15)$$

Por lo tanto :

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\sigma}}' &= \mathbf{D}_{ep} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}' \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}' &= \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ \dot{\mathbf{s}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{D}_{ep} &= \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{ep} & \mathbf{E}_s \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{E}_s : \mathbf{s} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{E}_s : I(\dot{p}_a - \dot{p}_w) \quad (17)$$

$$\mathbf{E}_{ep} = \mathbf{E} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m}^\sigma \otimes \mathbf{n}^\sigma : \mathbf{E}}{\mathbf{n}^\sigma : \mathbf{E} : \mathbf{m}^\sigma + H} \quad (18)$$

$$\mathbf{E}_s = - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma \otimes \mathbf{n}_i^s}{\mathbf{n}_i^\sigma : \mathbf{E} : \mathbf{m}_i^\sigma + H_i} \quad (19)$$

La tensión total es:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{E}_s : \mathbf{s} - \mathbf{I}_{vol} : \mathbf{s} \quad (20)$$

En donde :  $\mathbf{I}_{vol} = \frac{1}{3} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I}$  es el tensor de cuarto orden volumétrico

Por lo tanto se tendrá :

$$\begin{aligned}
 & \text{En general } \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} + (-\mathbf{I}_{vol} + \mathbf{E}_s) : \mathbf{s} \\
 & \text{si } \dot{p}_a = 0 \rightarrow \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon} - (-\mathbf{I}_{vol} + \mathbf{E}_s) : \mathbf{I} \dot{p}_w \\
 & \text{si } \dot{p}_a = \dot{p}_w = 0 \rightarrow \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}_{ep} : \boldsymbol{\varepsilon}
 \end{aligned} \tag{21}$$

## 4 MODELO CONSTITUTIVO PARA SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

### 4.1 Condición de fluencia

Para simular el complejo comportamiento de los suelos parcialmente saturados se considera<sup>[9] [12]</sup> :

- Formulación de dos superficies de fluencia , una superficie curva “aplanada” correspondiente al cono que se intersecta con otra superficie curva también “ alisada” en el plano meridiano.

- Definición de la superficie de fluencia Carga-Colapso (LC, Loading-Collapse) .

- Las variables de endurecimiento y ablandamiento de ambas superficies están basadas en el trabajo plástico de disipación.

- Regla de no asociatividad en el plano meridiano y asociada en el plano desviatorio en la región del cono y una regla de asociatividad en la región de capa.

- Capacidad del modelo para considerar las fuerzas de cohesión y una superficie curva en el plano meridiano de la región del cono.

La superficie de fluencia tiene la forma de un cono asimétrico, con el vértice localizado a la izquierda del origen del espacio de tensiones, dependiendo de las características cohesivas del material en cuestión y representada por la ecuación :

$$F_{cono} \{p, q, \theta, s, \kappa_{cono}\} = f \{ q, \theta, s \} - \eta_{cono} \{ \kappa_{cono} \} (p + s - p_c) = 0 \tag{22}$$

$$f\{q, \theta, s\} = q \left( 1 + \frac{q}{q_a} \right)^m g\{\theta\} \quad (23)$$

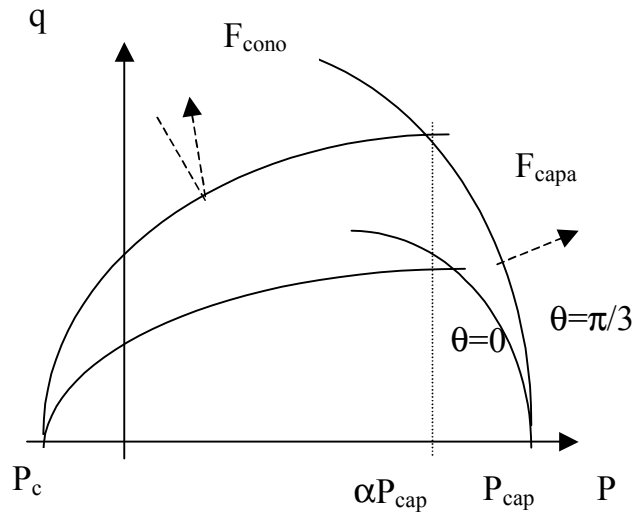
$$p = \frac{I_1}{3} ; q = \sqrt{3J_{2D}} ; \cos 3\theta = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(J_{2D})^3}} J_{3D} \quad (24)$$

donde  $q_a$  ,  $m$  ,  $\eta_{cono}$  y la cohesión  $p_c$  son parámetros del modelo y  $\kappa_{cono}$  es la variable de endurecimiento, calculada en base al trabajo plástico acumulado.

El parámetro  $p_c$  es la presión media en la que la función del cono intersecta al eje hidrostático y puede ser considerada como una medida de la cohesión (Figura N°1).

La cohesión del material  $p_c$  es variable con la succión según la ecuación :  $p_c = k s$  , con  $k$  parámetro del material .

Figura N°1: Forma de las Superficies de Cono y Capa en el espacio p-q



La superficie de capa, que involucra principalmente la respuesta volumétrica , viene dada por una superficie elíptica en plano meridiano expresada en términos de los invariantes de tensiones como :

$$F_{capa}(p, q, \theta, s, \kappa_{capa}) = \left( \frac{p - p_m}{p_r} \right)^2 + \left( \frac{f}{f_r} \right)^2 - 1 = 0 \quad (25)$$

## 4.2 Ley de endurecimiento

Los parámetros de endurecimiento y ablandamiento  $\kappa_{cono}$  y  $\kappa_{cap}$  se definen en término del trabajo plástico acumulado  $w^p$  que es disipado durante la carga en el actual camino de tensiones:

$$w^p = \int \sigma : \varepsilon^p dt \quad (26)$$

y en término de la ley incremental :

$$\dot{\kappa}_{cono} = \frac{1}{c_{cono} p_a} \left( \frac{p+s-pc}{p_a} \right)^{-l} \dot{w}^p \quad \dot{\kappa}_{cap} = \frac{1}{c_{cap} p_a} \left( \frac{p_{cap,0}}{p_a} \right)^{-r} \dot{w}^p \quad (27)$$

donde :  $c_{cono}$ ,  $c_{cap}$ ,  $p_a$ ,  $p_{cap,0}$ ,  $l$  y  $r$  son constantes del material<sup>[9]</sup>.

Se considera a  $p_{cap,0}$  como la presión de preconsolidación dependiente además del valor de la succión y que se define según la expresión de Schrefler<sup>[2]</sup>, y que se utiliza como una superficie de fluencia adicional conocida como “carga-colapso” como :

$$p_{cap,0} = p_0^* + i s \quad (28)$$

con :  $i$  constante del material,  $p_0^*$  es la presión preconsolidación en condiciones de saturación .

## 4.3 Ley de flujo

El modelo emplea dos funciones de potencial plástico. La ley de fluencia ideada por Sture y otros asume una ley de fluencia no asociada para el cono en correspondencia con un comportamiento expansivo, viene da por la expresión :

$$Q_{cono}(p, q, \theta, s) = f(q, \theta) - \left[ n + (1-n) \left( \frac{s_{max} - s}{s_{max}} \right)^t \right] \eta_{cono}(\kappa_{cono})(p+s-p_c) \quad (29)$$

con  $0 < n < 1$  parámetro escalar,  $s_{max}$  es la succión máxima en el suelo y  $t \geq 1$  parámetro que controla ley de flujo plástico . Se tiende a la asociatividad cuando  $s \rightarrow 0$ , y el máximo nivela de no asociatividad se alcanza cuando  $s = s_{max}$  .

Para la superficie de capa la regla de fluencia es asociada, por lo que la función de fluencia coincide con la función de potencial plástico .

## 5 CONDICION DE LOCALIZACION

Cuando ocurre una singularidad de segundo orden en el campo de los desplazamientos, se tiene un discontinuidad débil , aun cuando el campo de la tasa de deformaciones permanece continuo:



$$[[\mathbf{u}]] = \mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^- = 0 \quad (30)$$

$$[[\nabla_x \mathbf{u}]] = \nabla_x \mathbf{u}^+ - \nabla_x \mathbf{u}^- \neq 0 \quad (31)$$

Aplicando el Teorema de Maxwell, la condición de “salto” del gradiente de la velocidad:

$$[[\nabla_x \mathbf{u}]] = \gamma \mathbf{M} \otimes \mathbf{N} \quad (32)$$

con  $\mathbf{M}$  dirección del salto,  $\mathbf{N}$  normal a la superficie de discontinuidad y  $\gamma$  la magnitud del salto. Entonces, según la definición del tensor de deformaciones:

$$[[\boldsymbol{\varepsilon}]] = \frac{1}{2}(\nabla_x' \mathbf{u} - \nabla_x \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \gamma (\mathbf{N} \otimes \mathbf{M} + \mathbf{M} \otimes \mathbf{N}) \quad (33)$$

Admitiendo continuidad en el campo adicional de tasa de succiones:

$$[[\mathbf{s}]] = \mathbf{s}^+ - \mathbf{s}^- = \mathbf{0} \quad (34)$$

Considerando que a ambos lados de la superficie donde se produce la singularidad están en estado de carga plástica, el salto de la tensión total será según la ley constitutiva (22), y por la simetría del tensor  $\mathbf{E}$ :

$$[[\boldsymbol{\sigma}]] = [[\boldsymbol{\sigma}']] = \gamma \mathbf{E}_{ep} : (\mathbf{N} \otimes \mathbf{M}) \quad (35)$$

De acuerdo al lema de Cauchy el salto de la tasa del vector de tracción permanece continuo a través de la superficie de singularidad en el interior del sólido.

La condición de equilibrio toma la forma:

$$[[\mathbf{t}]] = \tilde{\mathbf{N}} : [[\boldsymbol{\sigma}]] = \gamma \mathbf{Q}_{ep} \cdot \tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{0} \quad (36)$$

Indicador de Localización:

$$\det(\mathbf{Q}_{ep}) = 0 \quad (37)$$

$$\mathbf{Q}_{ep} = \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E}_{ep} \cdot \tilde{\mathbf{N}} \quad (38)$$

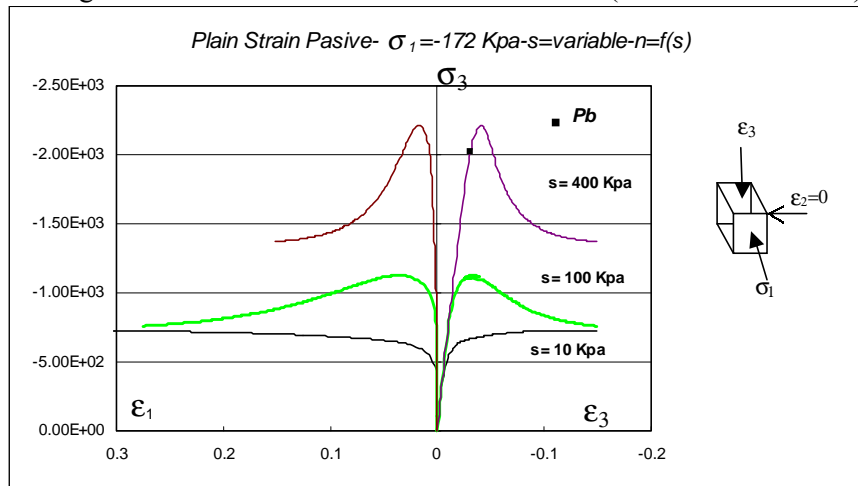
## 6 PREDICCIONES DEL MODELO

Las predicciones del modelo del comportamiento de suelos parcialmente saturados, se analizan para diferentes caminos de tensiones e historias de deformaciones. Particularmente se discute la influencia de la succión sobre dicho comportamiento. Los análisis numéricos realizados indican la capacidad predictiva del modelo en ensayos de deformación plana activa (PSA), deformación plana pasivo (PSP) y de compresión simple axialsimétrico.

La Figura N°2 muestra la predicción en deformación plana pasivo (PSP), en donde se dibujaron el tensor de tensiones neto con respecto a las deformaciones verticales y axiales

para diferentes estados de succión.

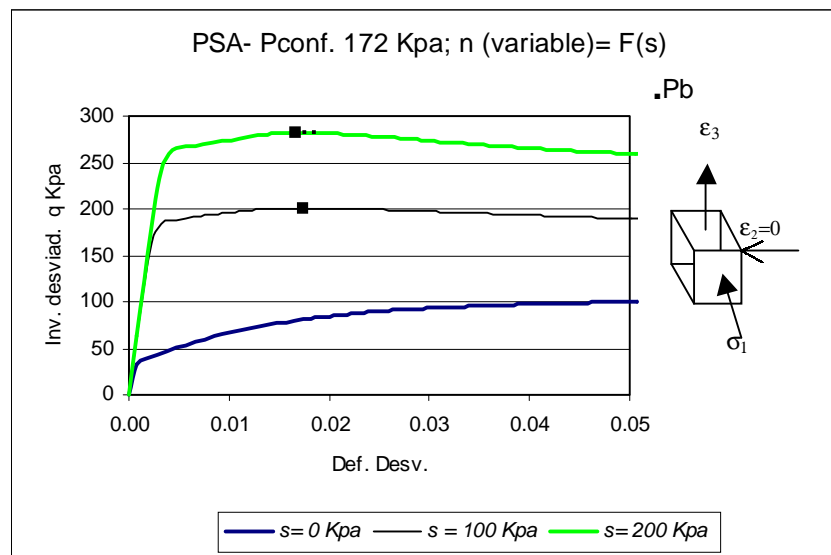
Figura N°2: Predicciones del modelo en PSP ( Plain Strain Pasive).



Los resultados observados muestran la fuerte influencia de la succión sobre el comportamiento de los suelos parcialmente saturados en términos de la tensión límite, la deformación lateral y la ductilidad. Particularmente se observa que con el incremento de la succión hay una disminución de la ductilidad con el aumento de la tensión límite y reducción de la deformación lateral.

La Figura N°3 muestra la predicción en estado de deformación plana activo (PSA), en este caso, a diferencia del PSP se aplica deformaciones de extensión en la dirección vertical y se grafica el segundo invariante  $q$  de tensiones netas con respecto a las deformaciones desviáticas  $e$  para diferentes estados de succión. El ensayo se realiza bajo control mixto.

Figura N°3: Predicciones del modelo en PSA ( Plain Strain Active)



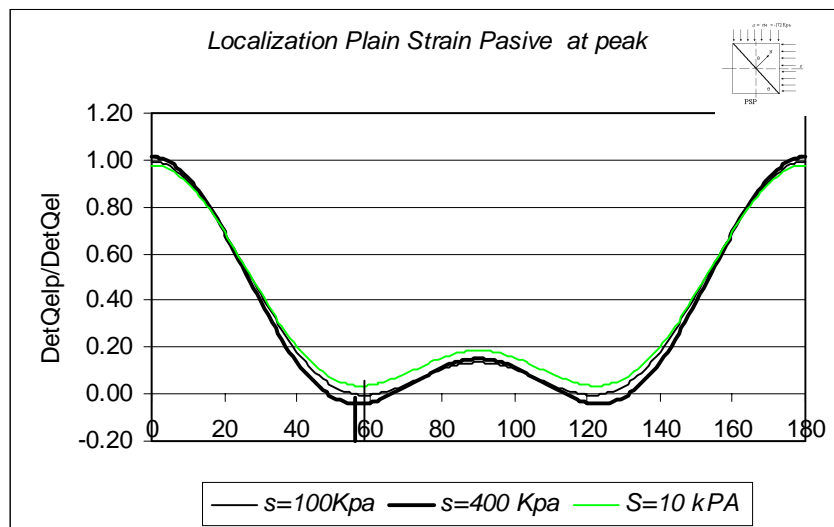
Se puede observar la fuerte influencia de la succión en la respuesta del suelo parcialmente saturado en condiciones de deformación plana.

## 7 ANALISIS DE LOCALIZACION

El análisis de la condición de falla localizada se realiza para diferentes estados de tensiones en PSP y PSA.

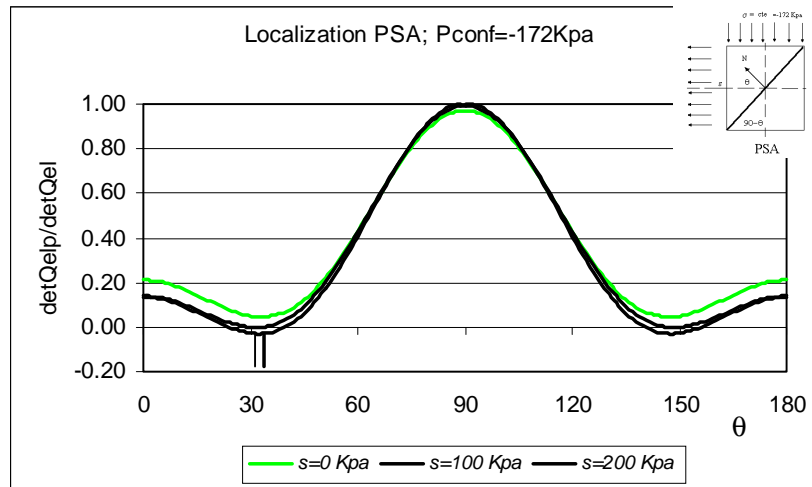
La Figura N°4 indica la condición de localización al 99,9% de la carga máxima en ensayo PSP. Se observa que la primera condición se logra para el estado tensional correspondiente a un nivel de succión  $s=400$  Kpa. En los otros casos con niveles de succión mas bajos de  $s=100$  Kpa y  $s=10$  Kpa se observa una condición de falla difusa, y el tensor acústico no se singulariza. Además se puede notar que la dirección crítica de localización varía con la succión. Por lo que se deduce que el tipo de falla ( localizada ó difusa) como la dirección crítica depende del nivel de succión del suelo.

Figura N° 4 Localización en PSP en el 99,9% del pico



La Figura N°5 indica la condición de localización para carga máxima en ensayo PSA. En ella se observa que la condición de falla localizada ó difusa tanto como la dirección crítica depende del grado de saturación.

Figura N°5 Localización en PSA .



En este caso de estado PSA se observa una disminución del efecto de la succión, alcanzando la condición de localización para valores bajos de succión muy cercanos a la condición de saturación en la que no se singulariza el tensor acústico. Los valores del ángulo crítico se pueden comparar con los obtenidos por D. Peric<sup>[13]</sup> para el modelo MRSLade, observándose la fuerte influencia sobre el mismo de las condiciones humedad del suelo que pone en evidencia el modelo extendido.

## 8. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una teoría constitutiva elastoplástica para suelos parcialmente saturados basado en el modelo MRS LADE, el que se define en el espacio de tensiones neta y succión, la que tiene una influencia relevante en la forma de la superficie de fluencia y esfuerzos máximos.

Los análisis predictivos del modelo propuesto demuestran su capacidad para reproducir las mas relevantes formas de respuestas del comportamiento de los suelos parcialmente saturados.

Por otro lado, el análisis de la condición de localización indica que el nivel de succión define la forma de la falla de difusa a localizada. Los resultados indican la influencia relevante de la succión en la dirección crítica de falla.

## 9 REFERENCIAS

- [1] E. Alonso ; A. Gens and A. Jose, *A constitutive model for partially saturated soils*. Geotechnique, 40, 405-430.(1990).
- [2] B. Schrefler, G. Bolzon, *Compaction in gas reservoirs due to capillary effects* Computational Plasticity, CIMNE .Barcelona.(1997).
- [3] Y. Cui, P. Delage , N. Sultan , *An elasto-plastic model for compacted soils*.

Unsaturated Soils. Vol.2 ,703-709. UNSAT'95.Balkema,Rotterdam (1995).

[4] G. Bolzon ; B. Schrefler and O. Zienkiewicz, *Elastoplastics soil constitutive laws generalized for partially saturated states*.Geotechnique, 46, 279-289.(1996).

[5] S. Wheeler , V. Sivakumar, *An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil* . Géotechnique, Vol.45(1),35-53(1995).

[6] Y. Kohgo, A consolidation analysis method for unsaturated soils coupled with an elastoplastic model. Unsaturated Soils,Vol.2. Balkema.Rotterdam, 1085-1093 (1995).

[7] A. Gens , *Constitutive modelling : application to compacted soils*. Proc. 1st Int. Conf. On unsaturated soils.Balkema Rotterdam,V.3,1179-1200(1995).

[8] N. Khalili , *Application of the effective stress principle to volumen change in unsaturated soils* .Unsaturated soils for Asia .Balkema Rotterdam,101-105(2000).

[9] R. Schiava, Tesis de Magister: *Modelación constitutiva elastoplástica para medios cohesivos friccionales parcialmente saturados*.Universidad Nacional de Santiago del Estero(2001).

[10] S. Sture, K. Runesson , E. Macari , *Analysis and calibration of a three invariant plasticity model for granular materials*. Ingenieur archive 59, 253-266(1989).

[11] S. Weihe, Master's Thesis : *Implicit integration schemes for multi-surface yield criteria subyeted to hardening/softening behavior*. University of Colorado at Boulder(1989).

[12] R. Schiava, G. Etse: *Modelación numérico computacional de suelos parcialmente saturados*. XIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural Jubileo Profesor Julio Ricaldoni. Punta del Este. Uruguay (2000).

[13] D. Peric , *Localized deformation and failure analysis of pressure sensitive granular materials* .Ph.D. Thesis. University of Colorado at Boulder(1990).