

ANALISIS DE FALLA EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Ricardo Schiava^{*} , Guillermo Etse[†]

^{*} Grupo de Mecánica Computacional
Universidad Nacional de Santiago del Estero,
Avda. Belgrano (s) 1912-4200-Santiago del Estero, Argentina
e-mail: schiava@unse.edu.ar

[†] CEMNCI Universidad Nacional de Tucumán
Avda. Roca , San Miguel de Tucumán, Argentina
e-mail: getse@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: suelos no saturados, elastoplasticidad, localización .

Resumen. *Se presenta un análisis de la condición de falla de taludes en suelos parcialmente saturados utilizando el modelo extendido de MRS Lade. El modelo constitutivo elastoplástico es una extensión del MRS Lade, donde la succión se introduce como componente adicional del estado de tensiones ¹. El problema en estudio es una base continua que está implantada en la cresta de un talud, en condiciones de estabilidad inicial antes de aplicarse las cargas de la cimentación y consecuentemente el análisis se realiza para estado plano de deformaciones. En el análisis se pone especial énfasis en la influencia del diseño de la malla de elementos finitos en el mecanismo de falla del talud y en la determinación de la carga última.*

Se estudian distintas mallas de elementos finitos y su influencia en la determinación de la carga última, se realiza un análisis de la condición de localización de falla y se aplica un procedimiento de alineamiento de la malla basado en la dirección crítica de bifurcación. Se compara la respuesta numérica de capacidad de carga última con la obtenida según la teoría clásica.

Finalmente se estudia la variación de la condición de estabilidad debida a cambios del contenido de humedad del suelo del talud por infiltración de agua.

1 INTRODUCCION

Para el estudio se considera el caso de una base continua que está implantada en la cresta de un talud, y consecuentemente el análisis se realiza para estado plano de deformaciones. La geometría del talud fue seleccionada teniendo presente que el mismo sea estable en condiciones naturales de peso propio y por lo tanto el problema planteado consiste en evaluar la capacidad carga última por la acción de la base ².

Los parámetros materiales utilizados en la simulación numérica corresponden a una arena limosa medianamente densa (44T-7M) usada para la modelación de fundaciones superficiales.

Los pasos utilizados para el análisis del problema son:

1. Análisis mediante elementos finitos con determinación de carga última, análisis de localización y procedimiento de alineamiento de la malla.
2. Análisis de las condiciones de estabilidad debida a cambios del contenido de humedad del suelo del talud por infiltración de agua de lluvia.
3. Determinación de la capacidad de carga última mediante la teoría clásica.

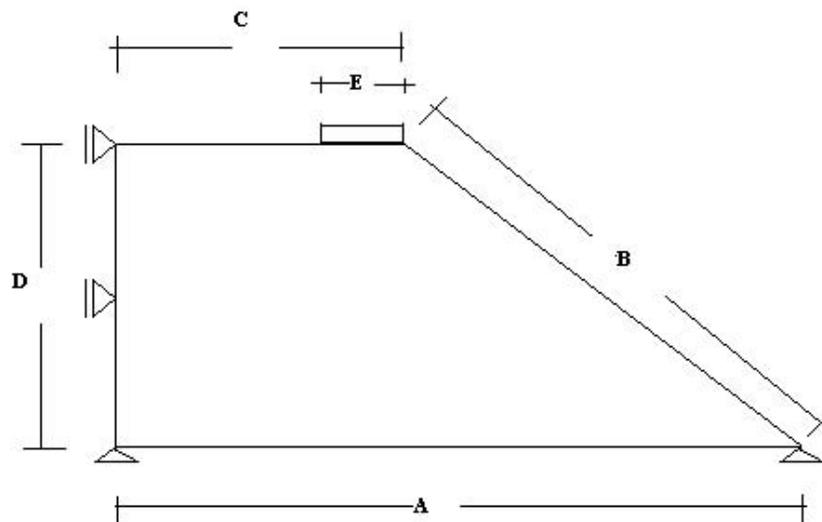


Figura 1. Geometría del talud y condiciones de borde.

La geometría del talud analizado y sus condiciones de borde se muestran en la Figura 1 y sus dimensiones en Tabla 1.

Dimensión	Modelo (m)
A	26.00
B	18.82
C	10.37
D	10.37
E	2.90

Tabla 1 Dimensiones del modelo

2 MODELO EXTENDIDO DE MRS LADE

El modelo extendido de MRS Lade para suelos parcialmente saturados se basa en:

- 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).
- 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:

$$F_{cono} \{ p, q, \mathbf{q}, s, \mathbf{k}_{cono} \} = f \{ q, \mathbf{q}, s \} - h_{cono} \{ \mathbf{k}_{cono} \} (p + s - p_c) = 0 \quad (1)$$

$$f \{ q, \mathbf{q}, s \} = q \left(1 + \frac{q}{q_a} \right)^m g \{ \mathbf{q} \}; \quad p = \frac{I_1}{3}; \quad q = \sqrt{3J_{2D}}; \quad \cos 3\alpha = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_{3D}}{\sqrt{(J_{2D})^3}} \quad (2)$$

donde q_a , m , h_{cono} y la cohesión p_c son parámetros del modelo y \mathbf{k}_{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.

La cohesión del material p_c es variable con la succión según la ecuación: $p_c = r_{pc} s$, con r_{pc} parámetro del material.

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:

$$F_{capa} (p, q, \mathbf{q}, s, \mathbf{k}_{capa}) = \left(\frac{p - p_m}{p_r} \right)^2 + \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 - 1 = 0 \quad (3)$$

2.1 Ley de endurecimiento

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

$$w^p = \int \mathbf{s} : \dot{\mathbf{e}}^p dt \tag{4}$$

$$\dot{\kappa}_{cono} = \frac{1}{c_{cono} p_a} \left(\frac{p + s - pc}{p_a} \right)^{-l} \dot{w}^p \qquad k_{cap} = \frac{1}{c_{cap} p_a} \left(\frac{p_{cap,0}}{p_a} \right)^{-r} \dot{w}^p \tag{5}$$

donde : c_{cono} , c_{cap} , p_a , $p_{cap,0}$, l y r son constantes del material¹.

Se considera: $p_{cap,0}$ la presión de preconsolidación dependiente además del valor de la succión y que se define según la expresión de Schrefler³, y que se utiliza como una superficie de fluencia adicional conocida como “carga-colapso” como :

$$p_{cap,0} = p_0^* + i s \tag{6}$$

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

Los parámetros del modelo extendido de MRS Lade¹ utilizados se indican en Tabla 2, y para el análisis se trabajó con una succión de $s = (p_a - p_w) = 300$ kPa

Parámetros	
E (kPa)	66000
n	0.20
e	0.70
m	0.03871
n	0.10
$y = \frac{h_{capa}}{h_{cono}}$	0.00
a	0.80
h_{cono}	1.54
r_q	1.50
k_1	0.50
k_2	0.75
c_{cono}	0.009
l	1.35
c_{capa}	0.30
r	1.50
P_o^*	20000
r_{pc}	-0.10
i	1.00

Tabla 2 : Parámetros del modelo extendido de MRS Lade.

3 ANALISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para el análisis mediante elementos finitos con determinación de carga última, análisis de localización y procedimiento de alineamiento de la malla se consideraron diferentes mallas denominadas R_0 , R_1 y R_2 que se grafican en Figuras 2,3, y 4 respectivamente.

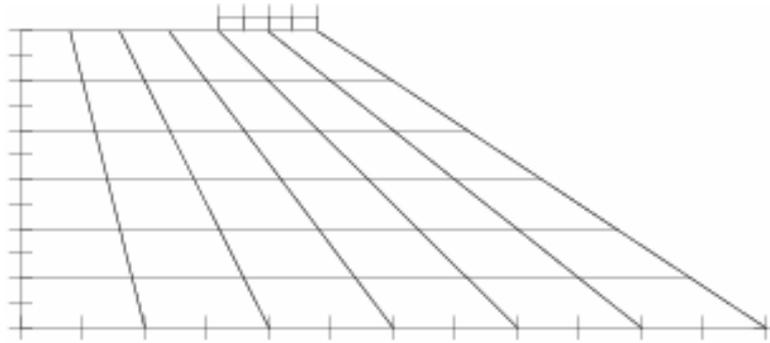


Figura 2. Malla R_0

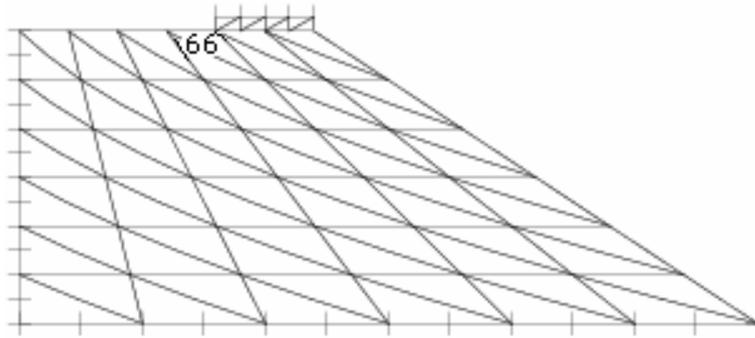


Figura 3. Malla R_1

La malla R_0 consiste de elementos cuadriláteros de nueve nodos, la R_1 de elementos triangulares de seis nodos y la R_2 de elementos triangulares de tres nodos⁴.

En la Figura 5 se muestra las curvas comparativas de las presiones de contacto promedio máximas y su correspondiente desplazamientos verticales impuestos a la base para las mallas R_0 , R_1 y R_2 .

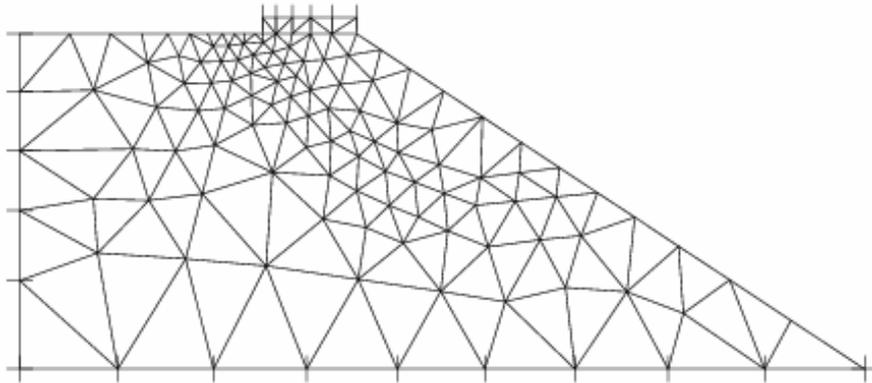


Figura 4. Malla R_2

En ellas se observa bastante concordancia para las mallas R_1 y R_2 y una subestimación de la presión de contacto promedio última para la malla R_0 , que se adjudica a la influencia del diseño de las mallas.

También vemos que para las mallas R_1 y R_2 en etapa de postpico tienden a estabilizarse para un mismo valor de carga residual.

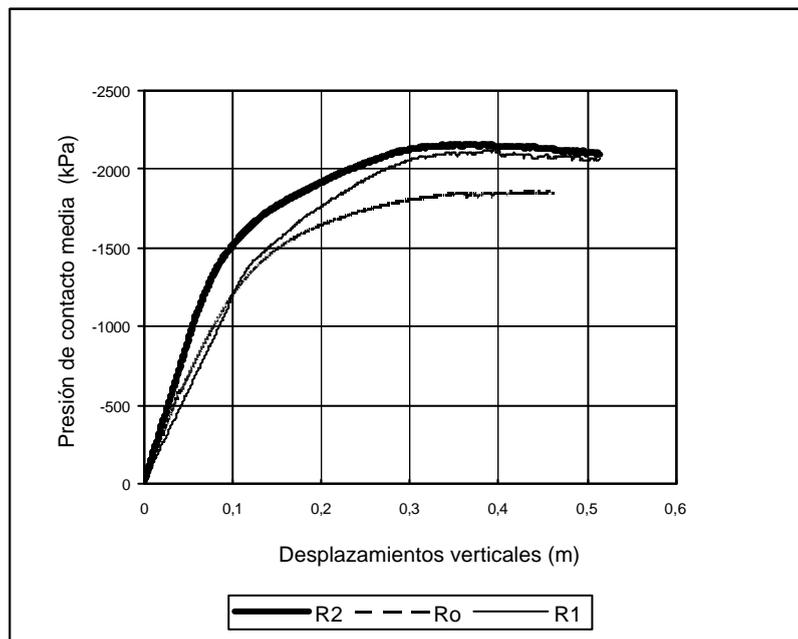


Figura 5. Presión de contacto promedio en función de los desplazamientos verticales.

La Tabla 3 provee los valores comparativos de las presiones de contacto promedio pico y el correspondiente desplazamiento vertical de la base para las diferentes mallas.

Malla	Presión de contacto Promedio en pico (kPa)	Desplazamiento vertical en pico (m)
R ₀	1845	0.371
R ₁	2124	0.391
R ₂	2155	0.353

Tabla 3. Comparación entre carga máxima y su desplazamiento vertical para las diferentes mallas

4 ANALISIS DE LOCALIZACION

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

$$[[\dot{\mathbf{u}}]] = \dot{\mathbf{u}}^+ - \dot{\mathbf{u}}^- = 0 \quad (7)$$

$$[[\nabla_x \mathbf{u}]] = \nabla_x \mathbf{u}^+ - \nabla_x \mathbf{u}^- \neq 0 \quad (8)$$

Aplicando el Teorema de Maxwell⁵, la condición de “salto” del gradiente de la velocidad:

$$[[\nabla_x \mathbf{u}]] = \mathbf{g} \mathbf{M} \otimes \mathbf{N} \quad (9)$$

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

$$[[\mathbf{e}]] = \frac{1}{2}(\nabla_x \mathbf{u} - \nabla_x \mathbf{u}) = \frac{1}{2}\mathbf{g}(\mathbf{N} \otimes \mathbf{M} + \mathbf{M} \otimes \mathbf{N}) \quad (10)$$

Admitiendo continuidad en el campo adicional de tasa de succiones:

$$[[\dot{\mathbf{s}}]] = \dot{\mathbf{s}}^+ - \dot{\mathbf{s}}^- = \mathbf{0} \quad (11)$$

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, y por la simetría del tensor \mathbf{E} :

$$[[\dot{\mathbf{s}}]] = [[\dot{\mathbf{s}}']] = \mathbf{g} \mathbf{E}_{ep} : (\mathbf{N} \otimes \mathbf{M}) \quad (12)$$

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:

$$[[\dot{\mathbf{t}}]] = \bar{\mathbf{N}} : [[\dot{\mathbf{s}}]] = \mathbf{g} \mathbf{Q}_{ep} \cdot \bar{\mathbf{M}} = \bar{\mathbf{0}} \quad (13)$$

El indicador de localización viene dado por ⁶:

$$\det(\mathbf{Q}_{ep}) = 0 \quad (14)$$

donde:

$$\mathbf{Q}_{ep} = \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E}_{ep} \cdot \tilde{\mathbf{N}} \quad (15)$$

$$\mathbf{E}_{ep} = \mathbf{E} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m}^s \otimes \mathbf{n}^s : \mathbf{E}}{\mathbf{n}^s : \mathbf{E} : \mathbf{m}^s + H} \quad (16)$$

Para el análisis de localización, se consideraron mallas arbitrarias al comienzo y luego, una vez obtenidos los primeros resultados y observadas las direcciones preponderantes de falla, se alinearon levemente estas mallas con las líneas de localizaciones.

4.1 Condición de localización en Malla R₁

Se analiza la condición de localización en los elementos de la malla R₁.

En la Figura 6 se grafica la relación $\det(\mathbf{Q}_{ep})/\det(\mathbf{Q}_{el})$ en función de θ ángulo de localización. Del análisis se observa que la localización comienza en el elemento 66, adyacente al lado de la base, y localiza con un ángulo $\theta = 54^\circ$ para un desplazamiento de 0.110 m; y progresando hasta un ángulo de $\theta = 57^\circ$ para desplazamientos mayores hasta 0.489 m.

Esta orientación del ángulo de localización, sugiere el punto de inicio y la dirección de la banda de corte para el diseño de la malla R₂.

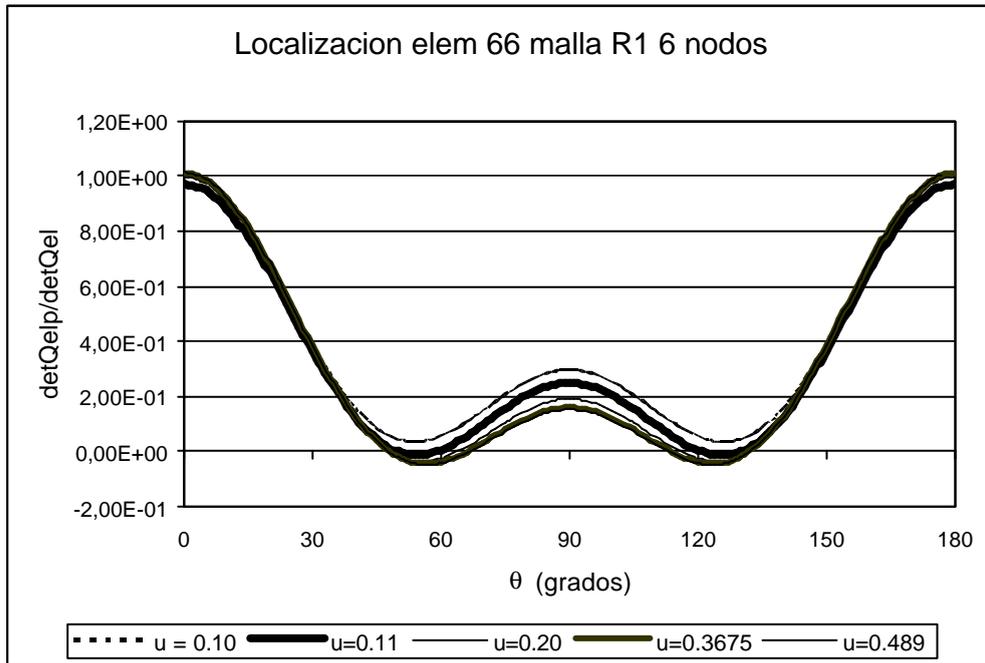


Figura 6. Condición de localización en elemento 66 de malla R₁

4.2 Condición de localización en Malla R₂

Se analiza la condición de localización detectada en los puntos de Gauss para la malla R₂. En la Figura 7 se muestra en detalle los elementos en el sector correspondiente a la parte de talud inmediatamente debajo de la zapata en los que se analiza la localización.

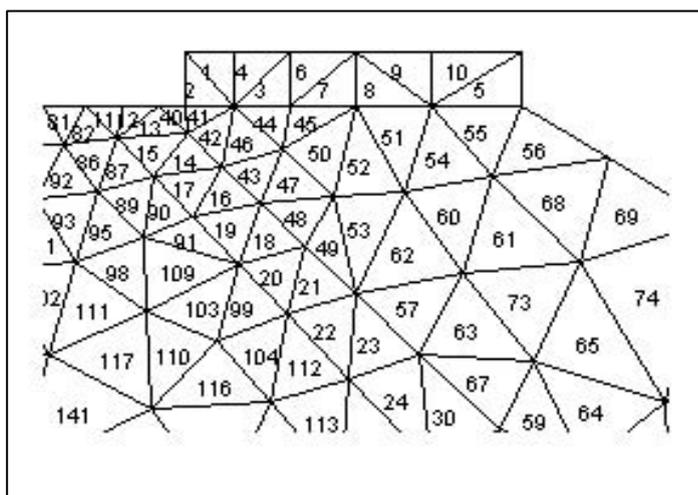


Figura 6. Condición de localización en elemento 66 de malla R₁

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la localización comienza en los elementos adyacentes al lado izquierdo de la base donde se inicia la banda de corte y progresa subsecuentemente hacia abajo hasta alcanzar el punto de salida. En la Figura 8 se indican los puntos de la curva carga-desplazamiento donde se ha analizado la condición de localización.

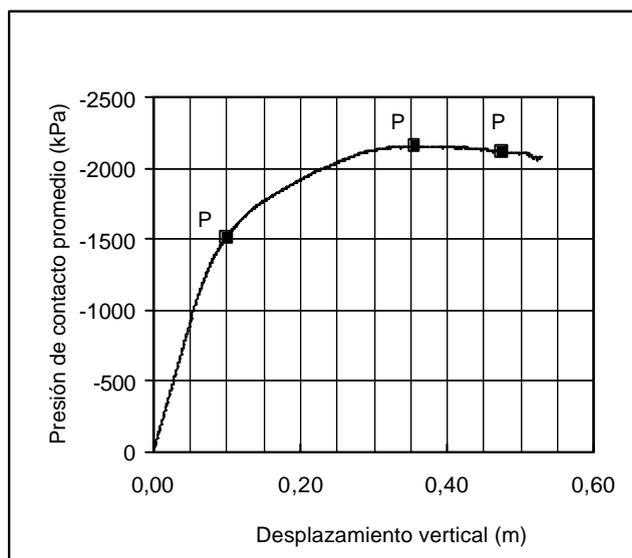


Figura 8. Presión de contacto promedio-desplazamiento vertical de la base para malla R₂.

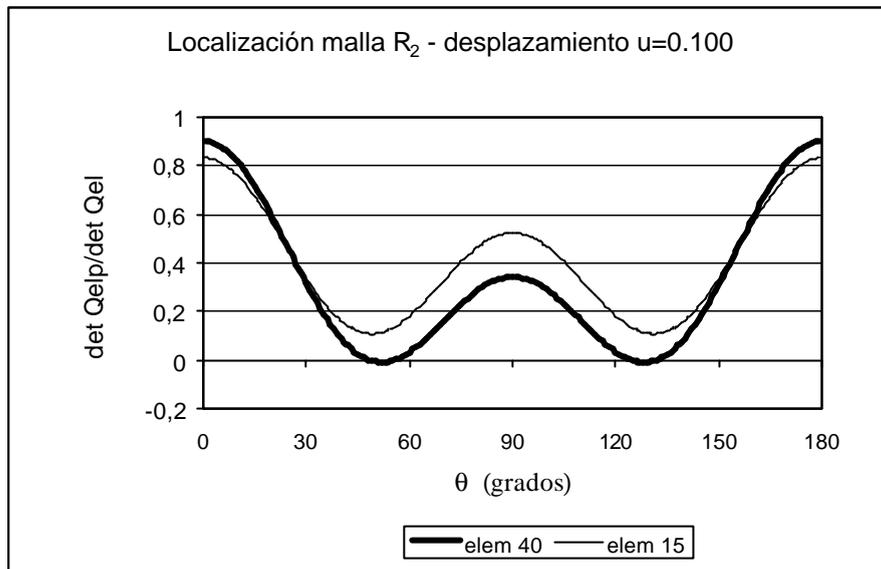


Figura 9. Localización elementos 15 y 40 para desplazamiento $u= 0.100$ m.

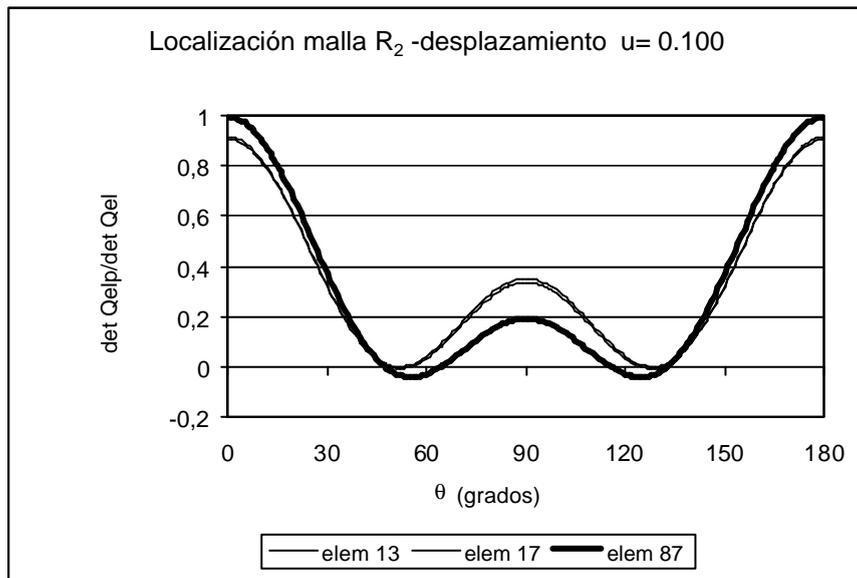


Figura 10. Localización elementos 13, 17 y 87 para $u= 0.100$ m.

Del análisis surge que la localización comienza en los elementos 40, 13 y 17 ubicados dentro de la banda de corte y con un ángulo $\theta = 52^\circ$ para un desplazamiento vertical de la base de 0.100 m, y el elemento 87 con un ángulo $\theta = 55^\circ$, como se observa en Figura 9 y Figura 10. Con el incremento de las deformaciones comienzan a localizar los otros elementos próximos y contenidos

dentro de la banda de corte, como ser el elemento 15 comienza a localizar con un ángulo $\theta = 52^\circ$ para un desplazamiento vertical de la base de 0.375 m correspondiente al pico de la curva carga-desplazamiento, como se indica en la Figura 11.

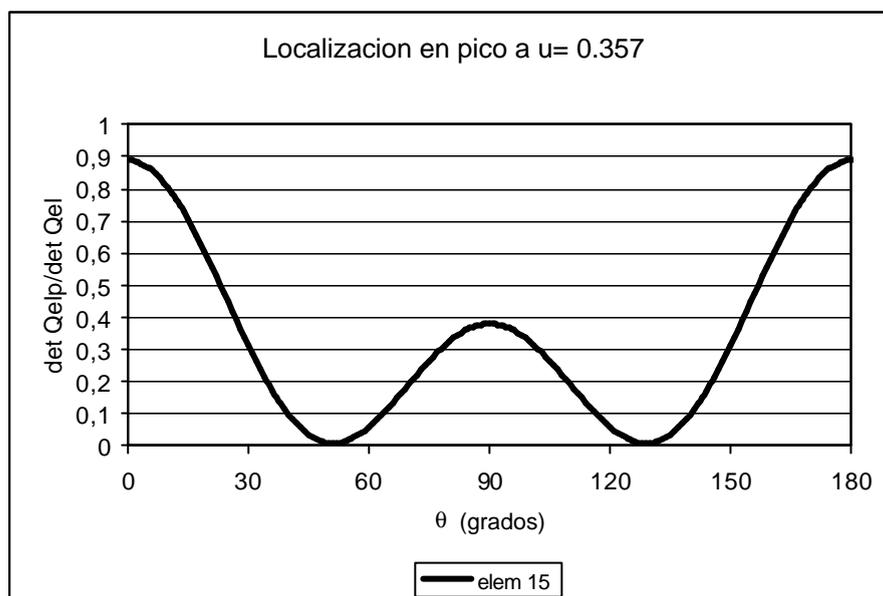


Figura 11. Localización elemento 15 en pico u= 0.357 m.

Diversos investigadores (entre otros P. Steinmann, G. Etse y K. Willam⁷) han demostrado que el CST es uno de los mejores elementos planos para captar problemas de localización, en el marco de formulaciones continuas de tipo "smeared crack" como las utilizadas en este trabajo.

Por otra parte, el análisis en este trabajo está referido a suelos parcialmente saturados, donde el espesor de la zona de localización tiene un ancho realmente finito y no implica una discontinuidad abrupta en la región espacial.

4.3 Deformaciones y desplazamientos

Las Figuras 12, 13 y 14 muestran la malla deformada y los vectores desplazamientos para la malla R_2 correspondientes a los tres puntos P_1 , P_2 y P_3 indicados en la curva carga-desplazamiento. De acuerdo a las figuras la localización de las deformaciones comienzan en la vecindad del lado izquierdo de la base, en concordancia con lo determinado a través de la condición de localización y que progresan gradualmente hacia abajo del talud hasta alcanzar el punto de salida.

Es interesante notar que se vislumbra la formación de dos bandas de corte simultáneamente, una primaria al lado izquierdo de la base y otra secundaria a la derecha para cuya captura no fuera diseñada la malla R_2 . La banda secundaria, que es de forma recta, conecta el lado derecho de la base con la banda primaria y el punto de intersección entre ambas bandas se encuentra por debajo de la base y a una profundidad aproximadamente igual al lado de la base.

Aquí, el mecanismo de falla que se visualiza hace recordar la representación familiar de la zona de estado activo de Rankine que “empuja” a las zonas de estado plástico radial del esquema de rotura propuesto en la teoría de Prandtl-Terzaghi⁸.

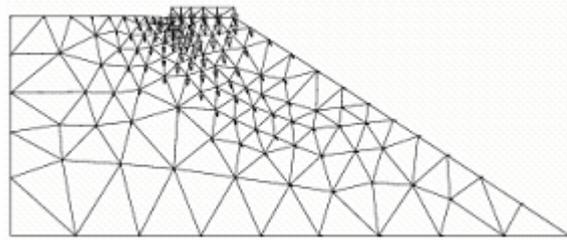


Figura 12. Malla deformada R_2 y desplazamientos para $u = 0.100$ m.

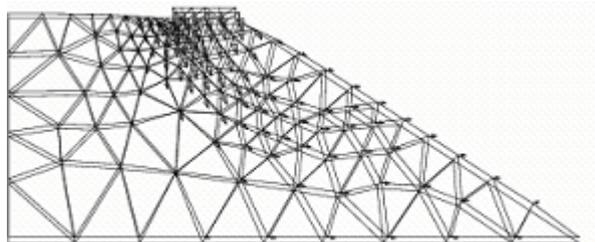


Figura 13. Malla deformada R_2 y desplazamientos para $u = 0.357$ m.

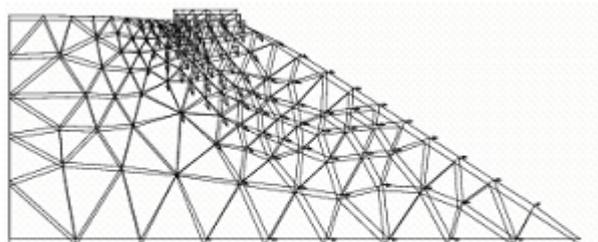


Figura 14. Malla deformada R_2 y desplazamientos para $u = 0.480$ m.

La Figura 15 muestra la malla R_1 deformada y desplazamientos y se observa que no capta adecuadamente el mecanismo de falla.

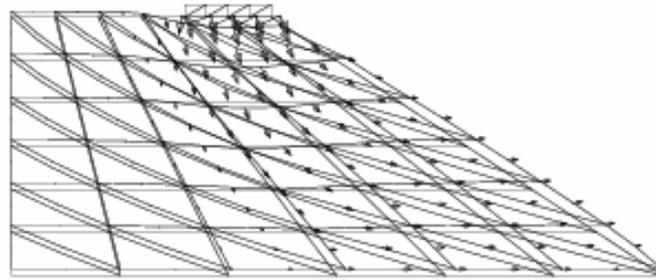


Figura 15. Malla deformada R_1 y desplazamientos para $u = 0.700$ m.

De los resultados obtenidos anteriormente se concluye que solo un diseño apropiado de la malla puede capturar el mecanismo de falla y predecir satisfactoriamente la carga máxima.

4.4 Análisis del talud con infiltración de agua

Las simulaciones realizadas anteriormente se hicieron para condiciones de humedad ó succión constante. Para analizar la influencia en el comportamiento del talud por cambio de las condiciones de humedad, se simula infiltración de agua de lluvia desde su parte superior^{9,10}. Con ese fin, se considera la malla R_2 donde se aplican cargas verticales a la base que corresponden al estado de carga para un desplazamiento de 0.100 m en condiciones de suelo con succión $s = 300$ kPa que fuera analizado anteriormente, Figura 16.

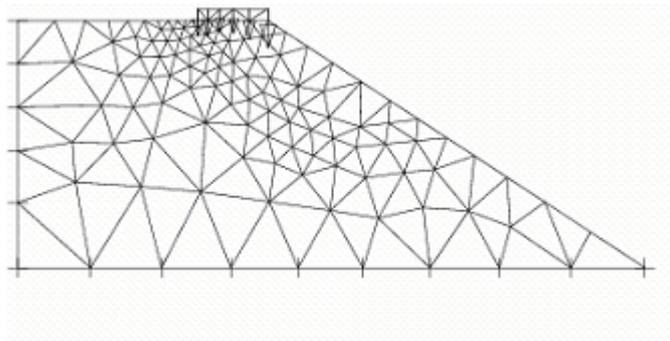


Figura 16. Malla R_2 y condiciones de borde y carga para análisis de flujo.

A continuación, se aplican las condiciones de succiones impuestas, que se muestran en Figura 17, para simular infiltración de agua de lluvia desde la parte superior del talud, que afecta el estado original de succión $s = 300$ kPa en que el suelo se encontraba en su faz inicial.

En dicha figura, se indican los valores de presión de poros impuestas, que se adicionan al estado inicial, alcanzando la parte superior el suelo su saturación con una succión final de $s = 0$ kPa.

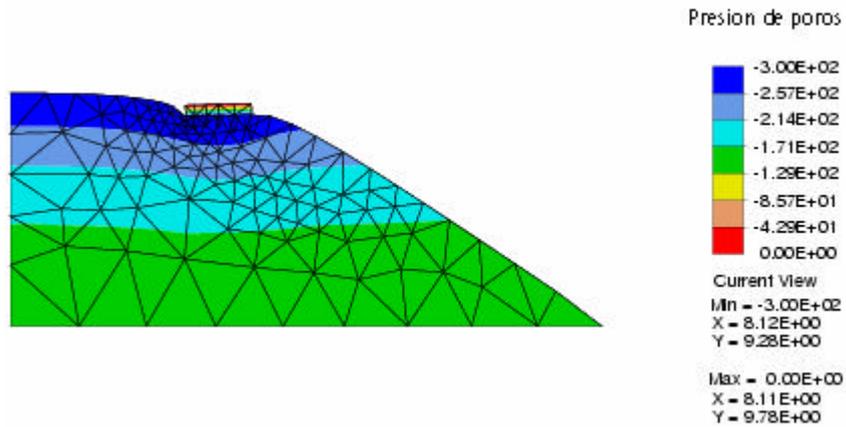


Figura 17. Malla R_2 y condiciones de presión de poros impuestas.

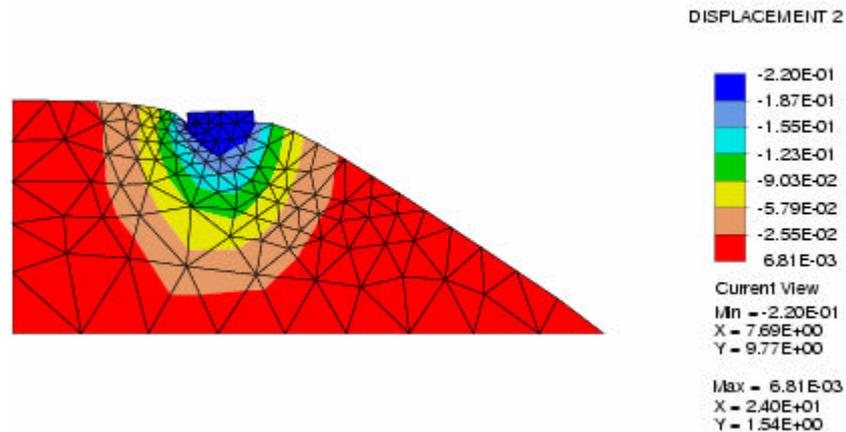


Figura 18. Malla R_2 y desplazamientos verticales obtenidos con infiltración.

En Figura 18 se observa que se obtiene un desplazamiento vertical de la base de 0.220 m que resulta más del doble que el obtenido en el análisis anterior de 0.100 m para un estado de succión de $s = 300$ kPa. También se visualiza un cambio en el mecanismo de falla, sin desarrollo de las superficies de falla general.

4.5 Determinación de la capacidad de carga con el método clásico.

Para evaluar la capacidad de carga de la base en consideración se aplica el método clásico de cálculo de la resistencia última a rotura por corte del suelo, de acuerdo al criterio de Pradtl-Terzaghi⁸ modificado. Para este caso de una base superficial sobre la cresta del talud, la resistencia viene dada por:

$$q_{ult} = c N_c \xi_{cg} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (17)$$

donde : q_{ult} es la capacidad de carga última

$N_c ; N_\gamma$ son los factores de capacidad de carga

ξ_{cg} factor que tiene en cuenta la inclinación del talud

γ peso unitario del suelo

De acuerdo con Winterkorn y Fang ¹¹ el factor ξ_{cg} viene dado por:

$$\xi_{cg} = 1 - \left[\frac{2 \omega}{(\pi + 2)} \right] \quad (18)$$

donde ω es el ángulo de inclinación del talud, que para este caso es de 33.7°.

Los valores obtenidos para la capacidad de carga última usando el método clásico se resumen en la Tabla 4.

Parámetros		Autor	q_{ult} (kPa)	Observación
C (kPa)	ϕ			
45	38°	Terzaghi	3466	CTC parámetros en pico
		Brinch-Hansen	3457	
		Meyerhof	3300	
20	37°	Terzaghi	2390	CTC parámetros residual
		Brinch-Hansen	2343	
		Meyerhof	2240	

Tabla 4. Capacidad de carga última según método clásico

5 CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio del mecanismo de falla de taludes en suelos parcialmente saturados con determinación de la condición de localización en estado plano de deformaciones. Se demuestra que la investigación de la formación y evolución de la banda de corte y su influencia sobre la determinación de la carga última puede realizarse mediante el estudio de la condición de localización conjuntamente con el procedimiento de alineamiento de malla.

Del mismo se deduce la importancia del diseño apropiado de la malla en la reproducción del mecanismo de falla y en la determinación de la capacidad de carga última.

De la comparación de la capacidad de carga última entre el método empleado de elementos finitos y la teoría clásica, resulta que esta última sobrestima valores para la determinación con

parámetros máximos y se aproxima para los parámetros residuales. La discrepancia se atribuye a la gran variación de los valores calculados de los factores de capacidad de carga N_c , N_q y N_g para la teoría clásica, según el autor, especialmente de N_g y es debido sobre todo a la orientación y desarrollo de la superficie de falla adoptada en cada formulación. Debe observarse que la falla por corte del suelo bajo carga de la zapata es un fenómeno de rotura progresiva con niveles de esfuerzos variables de tal manera que al alcanzar la superficie de falla el punto de salida, el esfuerzo es menor que el logrado en el pico.

6 REFERENCIAS

- [1] R. Schiava, “*Modelación constitutiva elastoplástica para medios cohesivos friccionales parcialmente saturados*”. Tesis de Magíster. Universidad Nacional de Santiago del Estero (2001).
- [2] D. Peric, *Localized deformation and failure analysis of pressure sensitive granular materials*. Ph.D. Thesis. University of Colorado at Boulder (1990).
- [3] B.A. Schrefler and G. Bolzon, “*Compaction in gas reservoirs due to capillary effects*”, Computational Plasticity, CIMNE,(1997)
- [4] R. L. Taylor, FEAP- A Finite Element Analysis Program. University of California at Berkeley (2003)
- [5] J. Maxwell, “*A Treatise in Electricity and Magnetism*”. Oxford (1873)
- [6] R. Schiava y G. Etse, “Análisis de localización en suelos parcialmente saturados”. *Mecánica Computacional. Vol XXII*, 2248-2260(2003)
- [7] G. Etse, P.Steinmann and K. Willam, “*Computational Aspects of Localized Failure Simulations in Plain Concrete*”, *Proc.Int. RILEM/ESIS Conf. Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, Eds J. van Miers, J.Rots & A. Bakker E & FN SPON, London,Vol 2 S.651-660* (1991)
- [8] K. Terzaghi and R. B. Peck, *Mecánica de los Suelos en la Ingeniería Práctica*. Editorial Ateneo. (1972)
- [9]G. Etse y R. Schiava ; “*Elastoplastic Constitutive Formulation for Partial Saturated Soils*” *7thUSCM. 7 th US National Congress on Computational Mechanics- Minisymposium : Computational Gemechanics-Sesion 4- Exp. 4-Albuquerque USA.*(2003)
- [10]R. Schiava y G. Etse: “*Elastoplastic Constitutive Theory for Partial Saturated Soil*”.*Int. Congress on Quality Assessment of Numerical Simulation in Engineering.Vol XXII.*(2002)
- [11] H. F. Winterkorn and H.Y. Fang : “*Foundation engineering handbook*”, van Nostrand Reinhold. (1975)