



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Análisis de esfuerzos en el cono de penetrómetros de uso agrícola

Rene A. Rodríguez, Luis A. Aguilar, Rene J. Rodríguez, Pablo R. Dellicompagni,
Alejandro R. Ferreiro

Departamento Académico de Mecánica – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero

Gral. Savio y La Forja – Parque Industrial. La Banda. Santiago del Estero - Argentina
Tel.: +54-3854372354 - e-mail: rene@unse.edu.ar, laguilar@unse.edu.ar, ferreiro@unse.edu.ar

RESUMEN

La compactación (evaluada como índice de cono – IC -) de suelos agrícolas y/o forestales determina la capacidad de desarrollo radicular de cultivos, lo que puede resultar del uso de maquinarias y equipos agrícolas/forestales. Suelos sueltos suministran un ambiente adecuado para la evolución de cultivos. Asimismo la percolación de agua de lluvia o de riego resulta afectada por capas de suelo compactadas. Una excesiva compactación reduce el rendimiento de los cultivos, haciendo necesario el control del nivel de valores de dicha compactación en los ambientes productivos a fin de su prevención o corrección. Un penetrómetro de uso agrícola es un instrumento utilizado para medir la resistencia de suelos, con valores de IC que se obtienen del hincado de una barra de acero que, en su extremo posee un cono de dimensiones y material especificados por las normas vigentes. Existen penetrómetros con distintas características de funcionamiento, que se diferencian en el modo en que se aplica la fuerza de empuje para concretar la penetración en el suelo, la que puede ser mediante una carga de impacto o con una fuerza aproximadamente constante. Con estos instrumentos se han ejecutado pruebas a campo, de resultados de las cuales se han detectado deformaciones permanentes en los respectivos conos. A partir de ello, es objetivo del trabajo el análisis del estado tensional en la pieza. A tal fin, se modela la misma, aplicándose un código de Elementos Finitos para lograr la distribución de tensiones y deformaciones. Del análisis, se verifica el material especificado para el cono y se considera la posibilidad de un tratamiento térmico.

Palabras Claves: Penetrometría, Suelo, Acero, Elementos Finitos, Esfuerzos.

1. INTRODUCCIÓN

En suelos agrícolas y forestales, la compactación (o resistencia del suelo) determina la capacidad de desarrollo radicular de cultivos, lo que puede resultar del uso de maquinarias y equipos agrícolas/forestales. Suelos sueltos suministran un ambiente adecuado para la evolución de cultivos. Asimismo la percolación de agua de lluvia o de riegos resulta afectada por capas de suelo compactadas. Una excesiva compactación reduce el rendimiento de los cultivos, haciendo necesario el control del nivel de valores de dicha compactación en los ambientes productivos a fin de su prevención o corrección. Una cuantificación habitual para la resistencia de suelos, se realiza mediante el índice de cono – IC -.

Un penetrómetro de uso agrícola es un instrumento utilizado para medir la compactación, con valores de IC que se obtienen del hincado de una barra de acero que, en su extremo posee un cono de dimensiones y material especificados por las normas vigentes. Existen penetrómetros con distintas características de funcionamiento, que se diferencian en el modo de aplicación de la fuerza de empuje para concretar la penetración en el suelo, la que puede ser a través de una carga de impacto o de una fuerza aproximadamente constante.

La geometría de los conos está definida por las normas vigentes, y el material está especificado como acero inoxidable. De la revisión y mantenimiento de estos instrumentos, con posterioridad a la ejecución de pruebas a campo [1], se han detectado deformaciones permanentes en los respectivos conos (Figura 1), en particular se ha relevado su localización próximas a sus vértices. Por ello, se estima pertinente concretar el análisis que explore el origen de las deformaciones producidas, como así sugerir alternativas que optimicen su diseño.

Se distinguen los penetrómetros que permiten establecer la resistencia de suelos duros y blandos. Los conos correspondientes a los primeros están sometidos a un mayor nivel de solicitaciones que el de suelos blandos. En consecuencia, el análisis se concreta para un cono de un instrumento que se aplica en suelos duros, cuya geometría se muestra en Figura 2.



Figura 1: Conos Suelos Duros (inferior) y Blandos (superior)

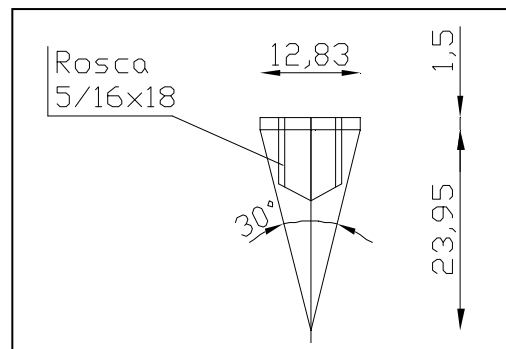


Figura 2: Geometría de cono para suelos duros

El análisis se implementa mediante la aplicación de un código de elementos finitos, cuya validación se expone en el tramo inicial. Actualmente, las simulaciones numéricas posibilitan expandir los límites de los pruebas experimentales, e incluso superarlos. Estas técnicas, encuadradas en la Ingeniería Asistida por Computadora (Computer Aided Engineering - CAE), permiten estudiar un problema, y eventualmente evaluar propiedades, factibilidad y rentabilidad de una solución. Constituyen un valioso instrumento de análisis en ingeniería.

En el desarrollo, primero se efectúa la modelación del problema, para lo cual se realiza la esquematización

de la pieza. En este tópico, se establecen distintas opciones para definir sus condiciones de borde, de modo que a partir de cada una de ellas se tienen cinco alternativas mediante las cuales se concreta la simulación del caso. Luego, a través de la aplicación de un código de Elementos Finitos (EF) se obtiene las distribuciones de tensiones y deformaciones para las opciones planteadas, que se discuten en el apartado siguiente. Finalmente, se exponen las conclusiones, destacándose que el análisis permite verificar el cono y proponer opciones que mejoren su diseño.

2. VALIDACIÓN DEL CÓDIGO DE EF

El código aplicado está basado en las ecuaciones de elasticidad de Navier. Para su validación, se expone en el presente apartado un problema estructural y se comparan las soluciones analíticas con las obtenidas mediante el Código de EF aplicado en el análisis estructural del cono [2].

El problema considerado es el análisis de tensiones en una placa de grandes dimensiones, que se encuentra traccionada uniformemente y que posee como escotadura un orificio circular de diámetro reducido, localizado en el centro de la misma. Mediante la Teoría Matemática de la Elasticidad, Foppl, Inglis et al. [3] han determinado las expresiones para las tensiones en cualquier punto de la pieza (Figura 3):

$$\sigma_t = \frac{\sigma_o}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_o}{2} \left(1 + 3 \frac{\rho^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_o}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_o}{2} \left(1 - 4 \frac{\rho^2}{r^2} + 3 \frac{\rho^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\sigma_o}{2} \left(1 + 2 \frac{\rho^2}{r^2} - 3 \frac{\rho^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) \quad (3)$$

Siendo r y θ la localización de un elemento diferencial en la placa, expresada en coordenadas polares, y ρ el diámetro del orificio. σ_t , σ_r , y τ , son tensiones, la primera en dirección normal al radio r , la siguiente en dirección coincidente con r , y la tercera, corresponde a las magnitudes tangenciales al elemento. En los extremos de la placa, se aplica la tensión σ_o , valor que se verificaría en cualquier punto de la misma sino existiera la escotadura. Se considera como crítica a la sección transversal A-A, coincidente con el centro del orificio ($\theta = 90^\circ$, $r \equiv x$), pues las solicitaciones en ella son mayores. Su distribución puede determinarse a partir de la ecuación (1):

$$\sigma_y = \sigma_t = \frac{\sigma_o}{2} \left(2 + \frac{\rho^2}{x^2} + 3 \frac{\rho^4}{r^4} \right) \quad (4)$$

Estos esfuerzos máximos se verifican en dirección longitudinal, dado que σ_r y τ son menores. En el borde de la escotadura ($x \equiv \rho$), se presenta la mayor tensión en toda la pieza, cuyo valor puede obtenerse a partir de la ecuación (4):

$$\sigma_{yMax} = 3\sigma_o \quad (5)$$

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{yMax}}{\sigma_o} = 3 \quad (6)$$

El coeficiente definido por esta expresión es el factor de forma, también denominado factor teórico de

concentración de tensiones.

Para el problema descrito, se ha implementado una modelación en un código de elementos finitos (EF). Por simetría, solo se considera una porción de la chapa, como se observa en la Figura 4. En esta gráfica se exhiben los resultados numéricos obtenidos. Se visualizan en color las tensiones, conforme la escala adjunta, y además se exhibe una malla que tiende a describir las deformaciones en la chapa.

En la Figura 5 se presentan las diferentes tensiones en la sección crítica, para una carga axial de 100 N/m^2 , que ratifica como de mayor importancia a σ_y , en coincidencia con lo anticipado mas arriba. En tanto, la gráfica siguiente muestra la comparación gráfica de las respectivas tensiones obtenidas numéricamente para la sección crítica y para otra próxima al borde de la chapa. Con los datos consignados en esta última figura, se calcula en la ecuación (7) el factor de forma, en la cual σ_{yMax} y σ_{yo} son las tensiones máxima y media, esta última correspondiente a una sección alejada de la escotadura.

$$\frac{\sigma_{yMax}}{\sigma_{yo}} = \frac{345.52}{99.8} = 3.46 \quad (7)$$

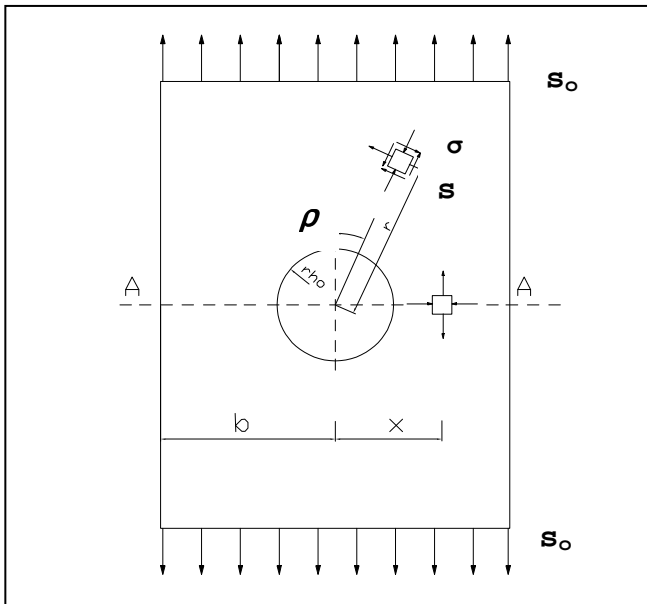


Figura 3: Placa con orificio central

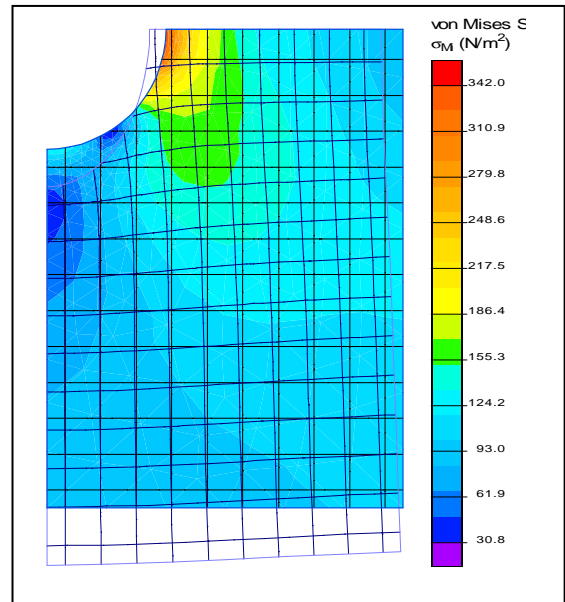


Figura 4: Placa con orificio

Para el factor de forma, la diferencia resultante entre los valores obtenidos analítica y numéricamente se considera reducida ($\approx 15\%$). Se interpreta como causa principal de esta discrepancia, que la expresión analítica se ha deducido considerando que la placa tiene ancho infinito, en tanto la placa empleada en la prueba numérica tiene dimensiones finitas.

Para disponer de un dato adicional, se recalcula el coeficiente considerando como denominador de la fracción, a la tensión media en la sección neta donde se localiza la escotadura. Como en las fibras coincidentes con el centro del orificio $\sigma_{Med} = 150 \text{ N/m}^2$, el valor resultante se tiene en ecuación (8).

$$\frac{\sigma_{yMax}}{\sigma_{yMed}} = \frac{345.52}{150} = 2.3 \quad (8)$$

La literatura establece valores del factor considerado obtenidos empíricamente. Seely-Smith [3], para una chapa con un orificio como el citado, establece un valor de 2.25. De esto resulta, entre los coeficientes obtenidos analítica y numéricamente, una discrepancia del 2%, la cual se considera aceptable.

La diferencia mencionada implica que los datos numéricos son acordes con los empíricos, por lo que se acepta cumplida la validación del código de EF aplicado en el trabajo.

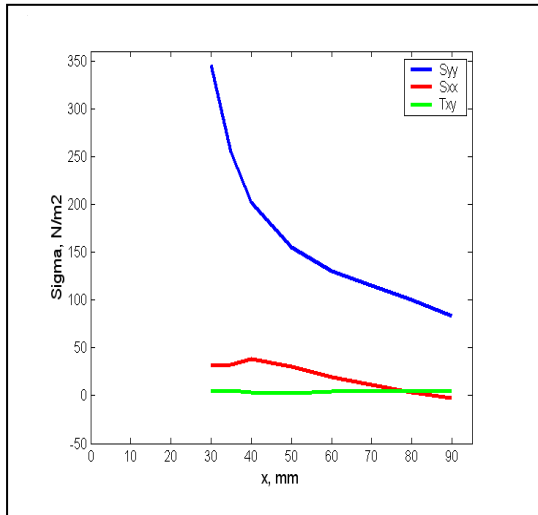


Figura 5: Tensiones en sección "crítica"

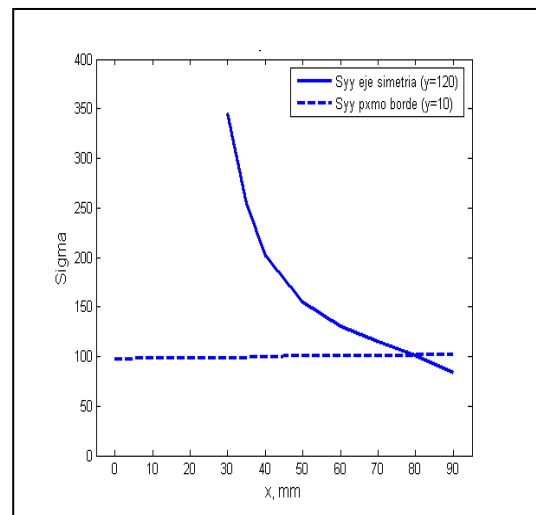


Figura 6: Comparación de tensiones

3. ANÁLISIS

El mismo comprende las siguientes instancias:

- 3.1. Modelación.
- 3.2. Resultados
- 3.3. Discusión

En las dos primeras etapas se utilizó un código de análisis por elementos finitos. Las gráficas de resultados logradas, han permitido formular las conclusiones que se proponen en el apartado 3 del presente.

3.1. Modelación

Esta instancia implica las actividades de pre-procesamiento correspondientes al problema. La fotografía de Figura 1 muestra los dos tipos de conos construidos para los penetrómetros desarrollados. En la parte superior de la misma, se evidencia el cono de mayor tamaño, destinado a su aplicación en suelos blandos, y abajo se tiene el de menor envergadura, que se utiliza en suelos duros. Este último, posee regiones con reducido espesor de material, y además por su empleo en suelos de mayor resistencia, se originan en él solicitaciones de mayor envergadura. Por esto, se estima significativo analizar las tensiones en un cono de un penetrómetro para suelos duros.

A efectos de responder al objetivo establecido, se ha modelado la geometría del sistema real en base a los datos especificados en la Figura 2 [4]. Considerando a la pieza como axisimétrica, se ha definido el modelo que se expone en la Figura 7, en el cual se ha fijado como eje de simetría al designado como "x".

Respecto a las propiedades del material, se asignaron las indicadas en la Tabla 1, propias del acero inoxidable, asumiendo al mismo como isótropo.

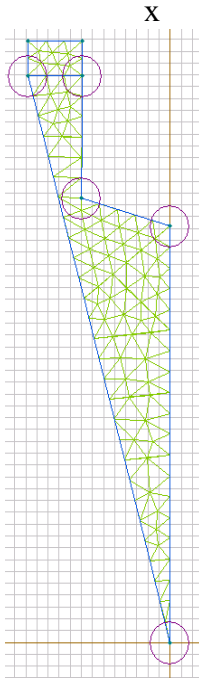


Figura 7: Modelo geométrico del cono y malla EF

Tabla 1: Características del material

Propiedad	Valor	Unidad
Modulo de Young E	207	GPa
Coefficiente de Poison μ	0,3	--

Para realizar la simulación de tensiones se utilizó el software QuickField [5] versión para estudiantes, siendo necesario establecer las condiciones de frontera para completar el modelo, lográndose la conversión del sistema dinámico real en un otro estático que lo representa. Con el fin de explorar el modelo que mas se adapte a las condiciones de operación del elemento, se han considerado distintas opciones en las condiciones de borde, que se exponen más adelante para cada una.

En todas las opciones planteadas se ha utilizado la misma malla de EF (Figura 8), la cual posee 129 nodos. El código empleado automáticamente genera la misma.

En la Tabla 2 se detallan sintéticamente las cinco opciones consideradas, asumiendo en todas que el cono está solicitado a esfuerzos de compresión. En este cuadro se indican las respectivas gráficas que ilustran las opciones.

Tabla 2: Condiciones de frontera en opciones consideradas

Opción	Condiciones de borde		Figura
	Contorno Fijo	Carga de cálculo y localización	
1	Rectas de contacto cono-vástago de empuje del penetrómetro (en rojo en gráfica).	Uniformemente distribuida en superficie externa de cono, paralela a eje "x" y con sentido positivo. Valor 80.3 kN/m^2 .	8 a
2	Rosca de unión cono-vástago (en rojo en figura).	Igual que en opción 1.	8 b
3	Vértice del cono (PF).	Uniformemente distribuida en rosca de unión cono-vástago del penetrómetro (en la gráfica flechas en verde). Se asume paralela a eje "x", con sentido negativo. Valor -670 kN/m^2 .	8 c
4	Diagonal del cono.	Igual que en opción 3.	8 d
5	Porción de la diagonal del cono (1/10 de su longitud).	Igual que en opción 3.	8 e

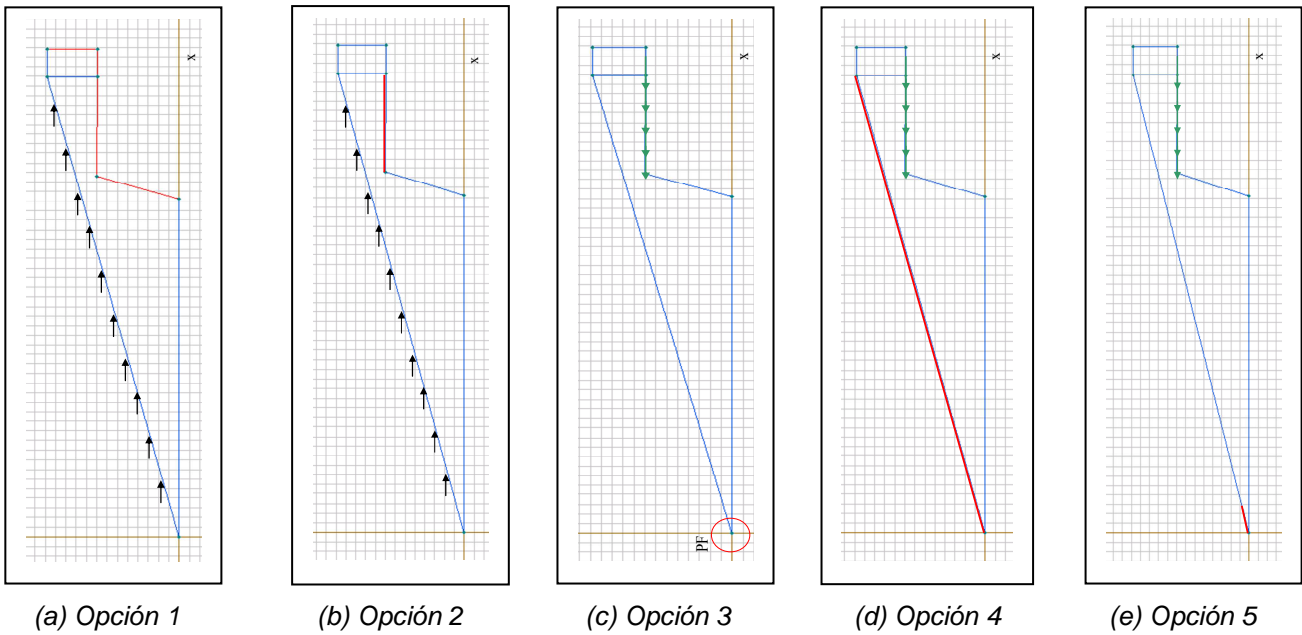


Figura 8: Condiciones de frontera

Tabla 3: Magnitudes en determinación de cargas

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de la pesa	m_{pe}	2.05	Kg
Masa del cuerpo del penetrómetro	m_c	1.8	kg
Masa total del penetrómetro ($m_{pe} + m_c$)	m_p	3.85	kg
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s^2
Altura de caída de la pesa	h	0.5	M
Penetración del cono en terreno	d	0.02	M
Área de aplicación de la carga	S_i	superficie exterior cono	0.005
		rosca de unión cono- vástago penetrómetro	0.00006
Coeficiente de corrección para obtener carga máxima	μ	1.5	-
Carga uniformemente distribuida en	r	superficie exterior cono	80.3
		rosca de unión cono- vástago penetrómetro	670
			kN/m^2

Las cargas distribuidas registradas en la Tabla 2 se han logrado a partir de la expresión (9) [6]. La misma se ha determinado para un penetrómetro de impacto considerando que:

- su principio de funcionamiento se basa en la pérdida de energía cinética del aparato de masa total m_p , debido al trabajo efectuado por la resistencia del terreno al ser penetrado una profundidad d ;
- se asume al choque como plástico, el que se verifica entre el cuerpo del penetrómetro de masa m_c y la pesa de masa m_{pe} , que cae desde una altura especificada h ;
- la masa del penetrómetro m_p se asume compuesta por la combinación de las masas de la pesa m_{pe} y del cuerpo del aparato m_c ;

Las magnitudes insertas en la ecuación (9) se explicitan en la Tabla 3, en la que se dispone además de las superficies de aplicación de la carga, para las Opciones 1-2 y 3-4-5.

$$r = \mu \frac{m_{pe}^2 \cdot g \cdot h}{m_p \cdot d \cdot S_j} \quad (9)$$

Los valores que obran en Tabla 3, se han asumido de los ensayos ejecutados en campo [1] y de la geometría de la pieza analizada. En el mismo cuadro se indican los resultados respectivos.

3.2. Resultados

Los resultados obtenidos mediante las respectivas ejecuciones del código de EF se exponen en las Figuras 9 a 13. En cada una de ellas se observa el mapa de tensiones conforme el criterio de Von Mises, la correspondiente escala, y también se exhiben las deformaciones en la pieza.

En la gráfica siguiente se muestra en detalle las tensiones en la región próxima al vértice del cono para la Opción 5.

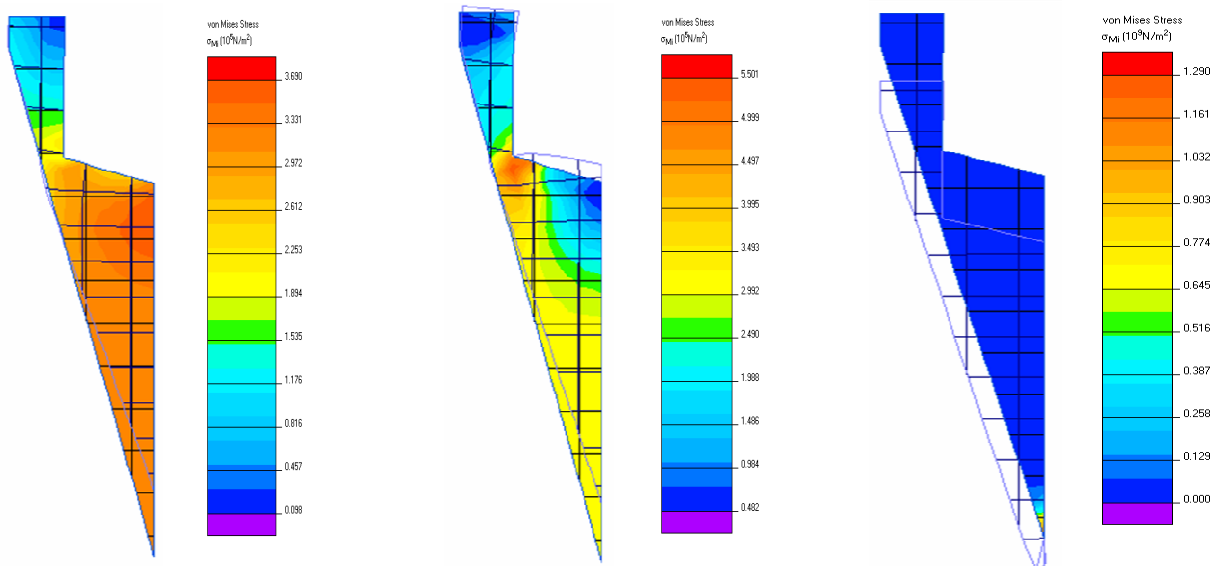


Figura 9: Tensiones Opción 1

Figura 10: Tensiones Opción 2

Figura 11: Tensiones Opción 3

3.3. Discusión

Para la Opción 1, en el diagrama de tensiones de la Figura 9 se observa que las solicitaciones distribuidas a lo largo del cono son próximas a 10^5 N/m^2 . Se releva un leve incremento de las tensiones (identificadas en el mapa con rojo de mayor intensidad), localizadas en la región central del cono, la que posee una importante masa resistente y que por tanto carece de interés para este análisis. Por lo expuesto, a partir de los resultados alcanzados, se considera que el Modelo que plantea esta Opción 1 no posee relevancia a efectos de la representación de los fenómenos examinados.

De la Figura 10 se infiere para la Opción 2, que las tensiones obtenidas son del orden de 10^5 N/m^2 , con una notable concentración de tensiones (en el mapa con rojo mas intenso) en la región localizada entre el fondo de la rosca y la superficie exterior del cono. Esta zona de la pieza se distingue por la exigua masa resistente, ya que tiene un reducido espesor. Pese a ello, en la región no se han verificado deformaciones ni menos aún la falla del elemento. Por tanto, se considera que el Modelo que plantea esta Opción 2, no es de interés para el análisis.

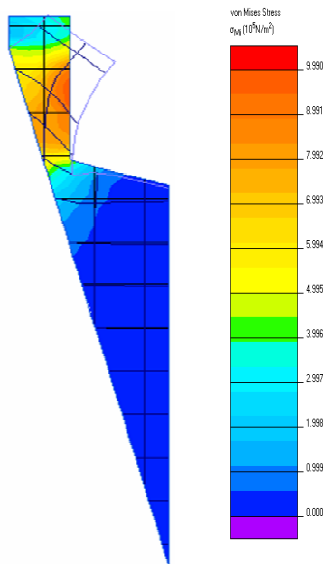


Figura 12: Tensiones Opción 4

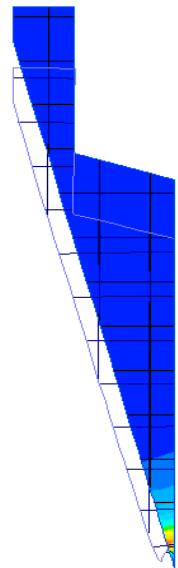


Figura 13: Tensiones Opción 5

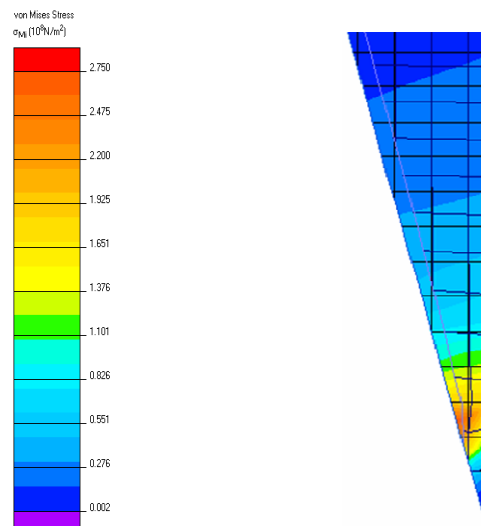


Figura 14: Tensiones Opción 5
Detalle en vértice cono

La gráfica siguiente muestra la distribución de tensiones obtenida para la Opción 3, con valores máximos cercanos a 10^9 N/m². Se destaca una notable acumulación de tensiones (en rojo de máxima intensidad en el mapa) en la punta del cono, región con reducida masa resistente por su pequeño diámetro. Las solicitaciones en esta zona superarían la tensión admisible de un acero inoxidable laminado en barra (345 MN/m² [8, 9]). En el resto de la pieza, se tendrían tensiones razonables con valores por debajo del máximo citado para el material. Estos resultados indicarían que la causa de las deformaciones verificadas en el vértice del cono, sería la localización de tensiones en la región, superándose la solicitación límite admisible. Por esta razón se considera que el Modelo que plantea la Opción 3, muestra resultados relevantes factibles de cotejar con los de otras opciones aceptables.

Para la Opción 4, la Figura 12 exhibe las tensiones que son del orden de 10^5 N/m². Se evidencia concentración de las mismas en la región central de la rosca de unión cono-vástago, zona que posee una masa resistente que no presenta dimensiones reducidas y que por tanto carece de interés para este análisis. Por lo expuesto, se considera que el Modelo de la Opción 4 carece de relevancia a efectos de la representación de los fenómenos examinados.

La figura 13 expone la distribución de tensiones para la Opción 5, en la que se observa que son del orden de 10^8 N/m². En el mapa puede detectarse una notable concentración de tensiones en la punta del cono (en rojo más intenso), zona de pequeño diámetro y reducida resistencia. Se destaca el fenómeno de localización en la ampliación de la Figura 14. Las solicitaciones en esta región serían muy próximas a la tensión admisible del acero inoxidable, mientras que en el resto de la pieza se tendrían valores por debajo del límite para el material. Nuevamente en este caso, los resultados indicarían que la causa de las deformaciones en el vértice del cono, sería la localización de tensiones. Por esta razón se considera que el Modelo que plantea la Opción 5, muestra resultados relevantes factibles de cotejar con los de otras opciones aceptables.

4. CONCLUSIONES

Se han planteado cinco opciones tendientes a explorar numéricamente las tensiones en el cono de un

penetrómetro para suelos duros. A partir de los resultados obtenidos para cada una de ellas, se considera que las Opciones 3 y 5 son las que permiten representar el problema considerado. Las condiciones de borde impuestas en ellas son similares, inclusive podría considerarse a la segunda de las alternativas citadas como una derivación de la primera, la cual permite representar una condición de frontera particular. Se aclara que en ambas, el hecho de fijar un punto o una recta (PF en Opción 3 y porción de la diagonal en alternativa 5) es una simplificación, pues en suelos agrícolas resistentes se entiende que se verificarán desplazamientos, aunque se consideran reducidos.

En consecuencia, se formulan las siguientes conclusiones:

- Las deformaciones en el vértice de los conos se producen porque las tensiones superan el valor admisible del material.
- Se sugiere emplear un acero inoxidable que pueda ser sometido a tratamientos térmicos que eleven la tensión admisible. En particular, se consideran apropiados los denominados aceros inoxidables martensíticos, los cuales sometidos a temple y revenido alcanzan valores límites de esa magnitud entre 700 y 1500 MN/m² [8, 9].

REFERENCIAS

- [1] C. Oneto, A. Ferreiro, L. Aguilar, R. Rodríguez, L. González, *Evaluación y revalidación a campo de resultados de índice de cono obtenidos con penetrómetros de resorte usados en la región NOA*, 3er. Simposio Internacional de Investigación, San Salvador de Jujuy, 2009.
- [2] A. Ferreiro, N. Nigro, *Expansión de métodos de análisis en ingeniería*, 3er. Simposio Internacional de Investigación, San Salvador de Jujuy, 2009.
- [3] F. Seely, J. Smith, *Curso Superior de Resistencia de Materiales (Advanced Mechanics of Materials)*, Edit. Nigar, Buenos Aires, 1986.
- [4] Ferreiro A., Oneto C., Rodríguez R., González L., Aguilar L., Valenzuela J., Coronel M. *Un equipo patrón para las evaluaciones de resistencia de suelos agrícolas por penetrometría*. XXVII Jornadas IRAM – Universidades. Santiago del Estero, 2007.
- [5] Tera Analysis Ltd. *Students' QuickField 4.2T*. http://www.quickfield.com/free_soft.htm, 2009.
- [6] S. Timoshenko, D. Young, *Mecánica Técnica*, Ed. Hachette, 1969.
- [7] F. Beer, E. R. Johnston, *Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica*, Ed. Mc Graw- Hill, 1990.
- [8] J. Shigley, Ch. Mischke, *Diseño en Ingeniería Mecánica*, McGraw Hill, México, 1993.
- [9] IRSACERO S.A., *Datos de aceros inoxidables*, http://iirsacero.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=35. Acceso 2009.