

Fisuras por Tensión

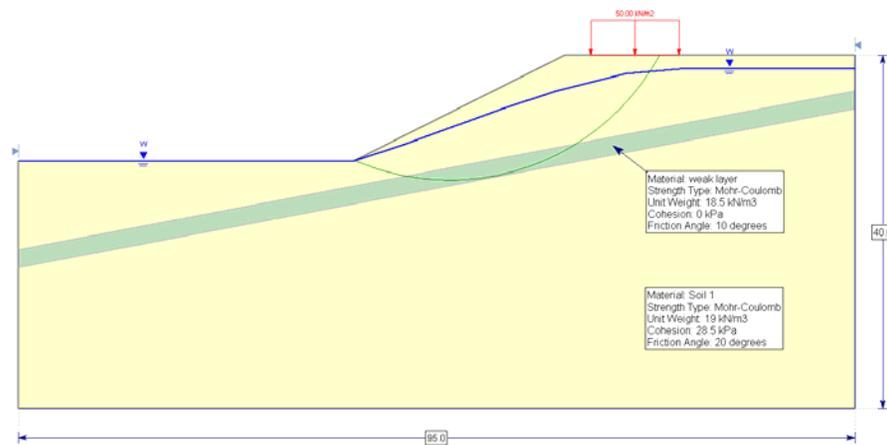
En los análisis de estabilidad del talud con suelos cohesivos, se pueden observar las fuerzas de tensión en la parte superior del talud. Generalmente, los suelos no pueden soportar la tensión, de modo que, los resultados de estos análisis no son precisamente correctos. Con el fin de obtener mejores resultados, se podría introducir un límite de fisura por tensión. Una fisura por tensión finaliza básicamente la superficie de falla, de esta forma eliminan los esfuerzos por tracción de los cálculos. En este tutorial, las fisuras por tensión se introducen dentro de un modelo del *Slide* y se describen diferentes métodos para determinar la profundidad de la fisura por tensión.

El tutorial está compuesto por tres partes. Se puede acceder a todos los archivos del tutorial instalados con el *Slide* 6.0, al seleccionar Archivo> Carpetas Recientes> Carpeta de Tutoriales (“File > Recent Folders > Tutorials Folder”) desde el menú principal del *Slide*.

Temas desarrollados

- Límites de fisura por tensión
- Profundidad de fisura por tensión
- Búsqueda de Datos de Corte
- Eje de tracción
- Análisis de Sensibilidad

Geometría



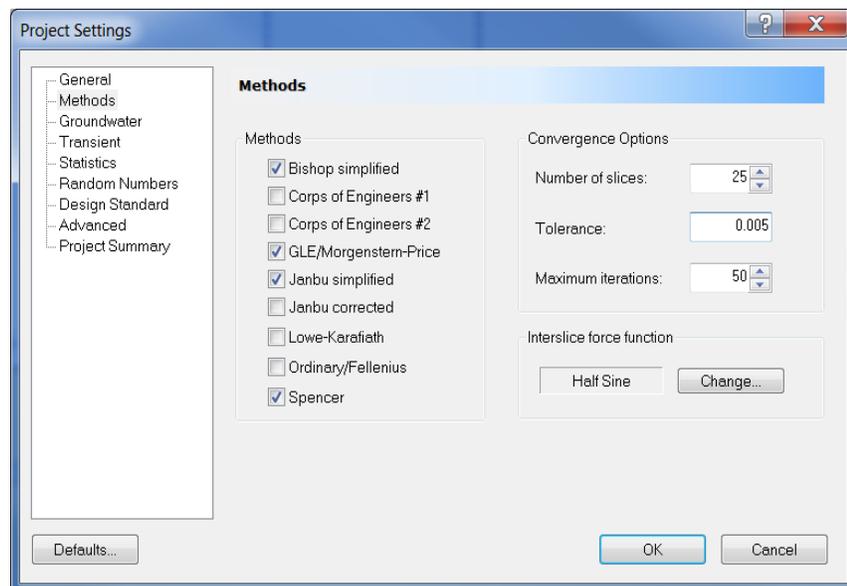
Modelo sin fisuras por tensión

Inicie el programa Modelo (“Model”) del *Slide*. Para este tutorial, empezaremos con el modelo del **Tutorial 2**. Para abrir este archivo, diríjase al Archivo> Carpetas Recientes> Carpeta de Tutoriales (“File > Recent Folders > Tutorials Folder”) y elija el archivo **Tutorial 02 Materiales y Carga.slim** (“Tutorial 02 Materials and Loading.slim.”)

Parámetros del Proyecto (“Project Settings”)



Abra la ventana de diálogo **Parámetros del Proyecto** (“**Project Settings**”) desde el menú **Análisis** (“**Analyses**”) y seleccione **Métodos** (“**Methods**”) en la izquierda. Revise el método GLE/Morgenstern-Price y el método Spencer, tal como se muestra. Necesitamos utilizar estos métodos de análisis con el fin de obtener el eje de tracción, el cual se desarrollará más adelante en el tutorial.



Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo Parámetros del Proyecto (“Project Settings”).

Computar (“Compute”)

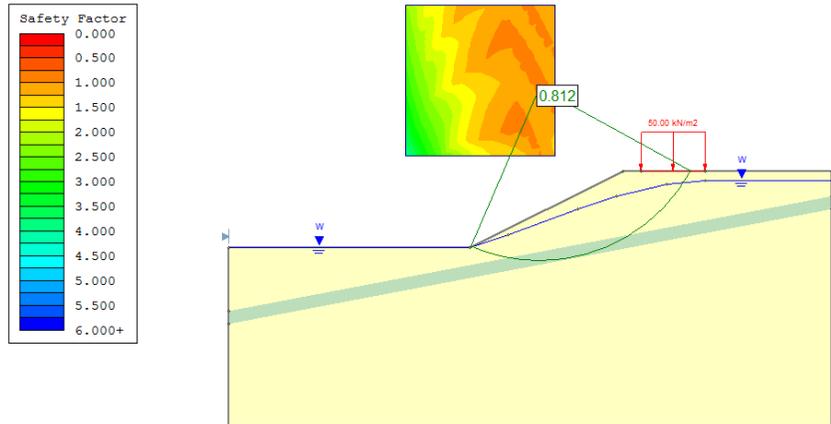


Guarde el modelo, utilice la opción **Guardar Como** (“**Save As**”) en el menú **Archivo** (“**File**”). Asegúrese de ponerle un nombre distinto, para que no escriba sobre el archivo para el Tutorial 2.

Elija **Computar** (“**Compute**”) desde el menú de **Análisis** (“**Analysis**”) para ejecutar el análisis y elija **Interpretar** (“**Interpret**”) desde el menú de **Análisis** (“**Analysis**”) para visualizar los resultados.

Interpretar (“Interpret”)

El programa Interpretar (“Interpret”) muestra los resultados del análisis Bishop Simplificado por defecto. Cambie el análisis al análisis Spencer, utilice el menú desplegable en la barra de herramientas. Los resultados deben verse de la siguiente manera:

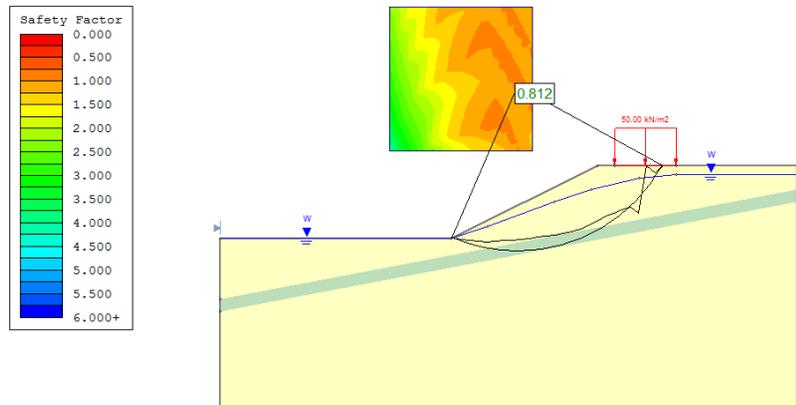


Usted puede ver un factor de seguridad igual a 0.81 aproximadamente.



Para los métodos Spencer (y GLE), podemos graficar un eje de tracción para el análisis. Diríjase al menú Búsqueda y elija **Mostrar Eje de Tracción** (“Show Line of Thrust”). (NOTA: la opción eje de tracción no está disponible para los métodos Bishop o Janbu).

El gráfico debe lucir así:

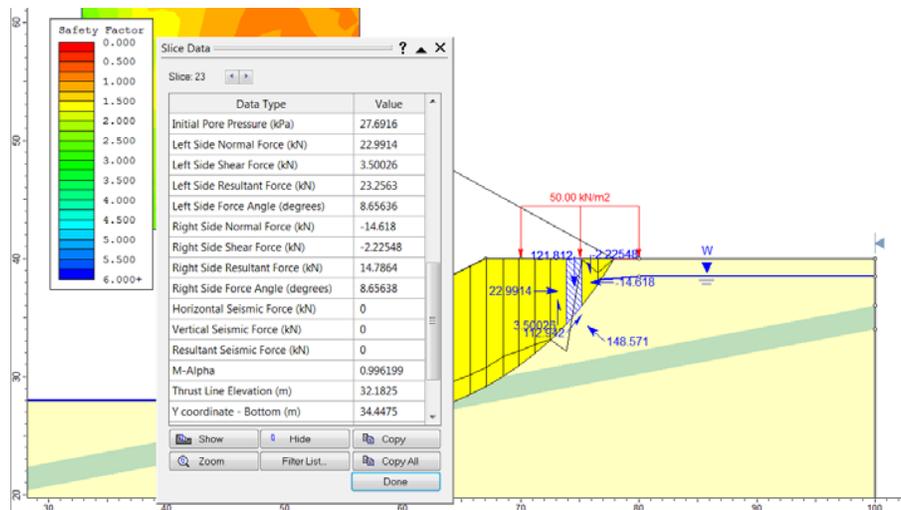


El eje de tracción proporciona la ubicación de las fuerzas resultantes entre cortes (vea los temas de ayuda del *Slide* para más información). Lo importante es observar que el eje de tracción se extiende *fuera* de la masa deslizando cerca de la parte superior del talud. Esto indica generalmente que existe tensión.

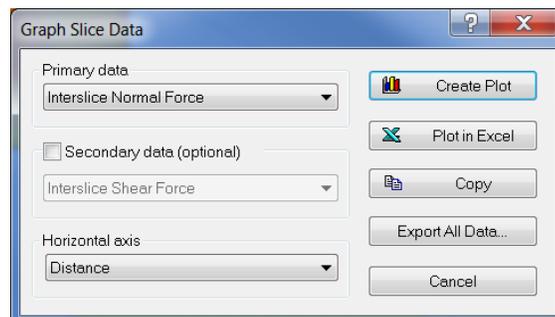


Para examinar esto más a fondo, podemos visualizar el equilibrio de fuerza en cada corte. Desde el menú de **Búsqueda** (“Query”), elija Búsqueda de Datos de Corte (“**Query Slice Data**”). Cuando haga clic sobre los cortes individuales, usted verá las fuerzas. En cuanto a los cortes que se encuentran cerca de la parte superior del talud, usted podrá observar que las fuerzas entre cortes son negativas (note el símbolo menos de la parte delantera de la magnitud de fuerza).

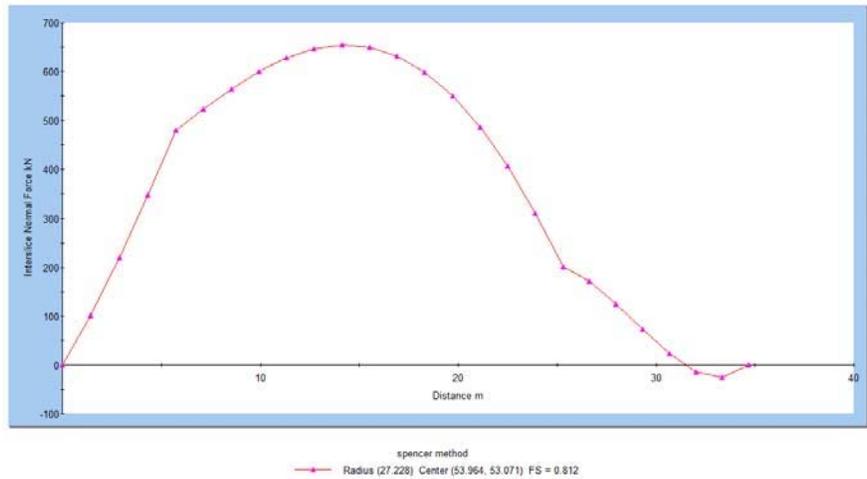
El tercer corte de la parte superior muestra las fuerzas negativas en un lado y las fuerzas positivas en el otro, tal como se muestra en la imagen. Este corte representa la transición desde la tensión hasta las fuerzas entre cortes compresivas en la masa deslizante. De la profundidad al fondo de este corte puede proporcionar un estimado aproximado en lo que respecta a la profundidad de la fisura por tensión que se requerirá para eliminar la tensión en el modelo. En este caso la profundidad es de aproximadamente 4.5 m.



Asimismo, podemos graficar las fuerzas entre cortes para observar la tensión. Primero elija la ventana de diálogo Datos de Corte (“Slice Data”). Haga clic derecho en la superficie de falla y seleccione Graficar Búsqueda (“Graph Query”) desde el menú desplegable. En la ventana de diálogo Gráfico de Datos de Corte (“Graph Slice Data”), seleccione Fuerza Normal entre Cortes como Datos Primarios (“Primary Data”) para graficar y seleccione el botón Crear Gráfico (“Create Plot”).



Usted debe ver el siguiente gráfico. Note las fuerzas negativas para los cortes en la parte superior del talud. Asimismo, note que la magnitud absoluta de la tensión es relativamente menor, en comparación con las fuerzas de compresión más abajo de la pendiente.



Nosotros volveremos a ejecutar el modelo con un límite de fisura por tensión para tratar de eliminar la tensión.

Modelo con límite de fisura por tensión



Vuelva al programa modelo del *Slide*. Ahora, deseamos eliminar la tensión en el modelo. Duncan y Wright (2005, capítulo14) nos proporcionan una charla informativa sobre la tensión en la zona activa, y describen como se pueden eliminar los efectos de tensión en los cálculos de estabilidad del talud, al añadir una fisura por tensión. En el *Slide*, podemos ingresar un límite de fisura por tensión para delimitar la extensión más baja de cualquier posible fisura por tensión. El truco esta en determinar la profundidad en la que debemos colocar este límite.

Como antes, usted podrá utilizar la profundidad del primer corte en donde se observe la tensión (~ 4.5 m). Opcionalmente, las ecuaciones analíticas han sido derivadas para determinar la profundidad de una fisura por tensión; por ejemplo, Abramson et al. (2002) nos proporcionan esta relación:

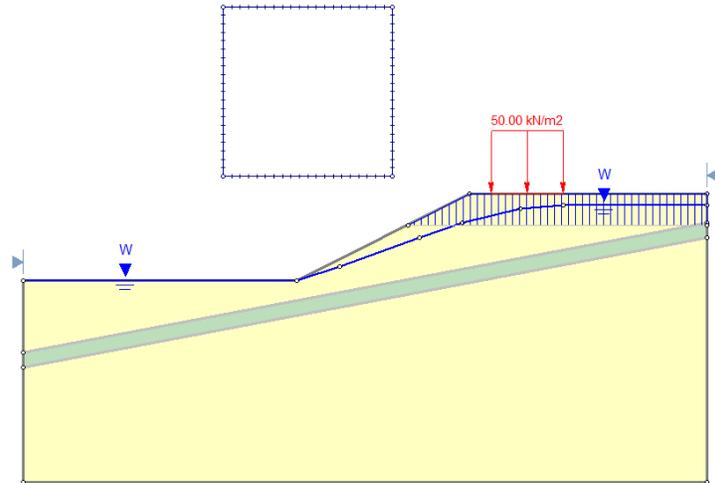
$$Z_c = \frac{2c}{\gamma \tan \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)} \quad 1$$

En donde z_c es la profundidad de la fisura por tensión, c es el material de cohesión, ϕ es el ángulo de fricción γ es la unidad de peso del material de suelo. Se obtiene esta ecuación, en términos de parámetros de tensión efectiva para un material homogéneo único (a pesar de que también se podrían utilizar los parámetros de resistencia no drenada cuando sea apropiado). Al utilizar esta ecuación, se calcula una profundidad de 4.3 m, la cual es muy cercana a nuestro valor estimado de 4.5.

La profundidad de fisura por tensión de 4.3 metros se traduce en una coordenada -y de 35.7 m, de manera que utilizaremos esto para delimitar el límite de fisura por tensión.

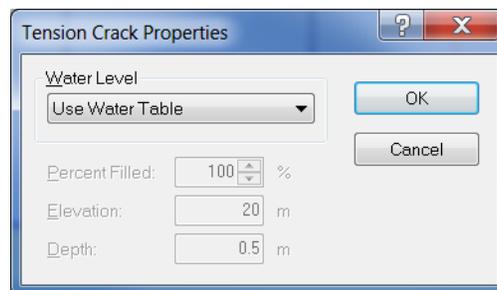


Para añadir el límite de fisura por tensión, diríjase al menú **Límites** (“**Boundaries**”) y seleccione **Añadir Fisura por Tensión** (“**Add Tension Crack**”). Ingrese el vértice derecho 100, 35.7. Queremos que el límite se extienda de forma horizontal para interceptar la pendiente, de modo que, haga clic derecho en el mouse y asegúrese que se haya colocado checks en las opciones Capturar (“Snap”), Ortho y OSnap. Cierre el menú de contexto y dibuje una línea horizontal que intercepte la parte de delante de la pendiente. Presione Ingresar (“Enter”) para finalizar la entrada de puntos. El modelo debe lucir ahora de esta manera:

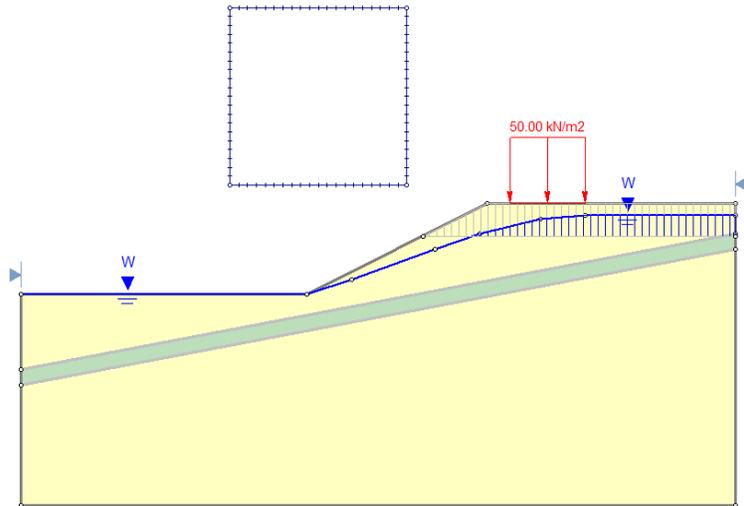


Usted puede ver como el límite delimita una zona de fisura por tensión. Cuando una potencial superficie de falla toca la línea, esta ascenderá de forma vertical hasta la superficie del suelo para crear una fisura por tensión.

Por defecto, se asume que la zona de tensión está saturada. La fisura por tensión cubierta representa el peor caso hipotético (esto proporcionará el factor de seguridad más bajo). Sin embargo, puesto que queremos comparar este modelo con el modelo sin fisura por tensión, utilizaremos la napa freática existente para definir la saturación por fisura. Para llevar a cabo esto, haga clic derecho en la zona de fisura por tensión y seleccione **Propiedades de Fisura por Tensión** (“**Tension Crack Properties**”). Para la Napa Freática (“**Water Table**”), elija Utilizar Napa Freática (“**Water Table**”), como se muestra a continuación:



Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo. El modelo debe lucir como a continuación:



Usted puede ver que ahora se muestran las posibles fisuras por tensión, saturadas sólo hasta la napa freática.

Computar (“Compute”)

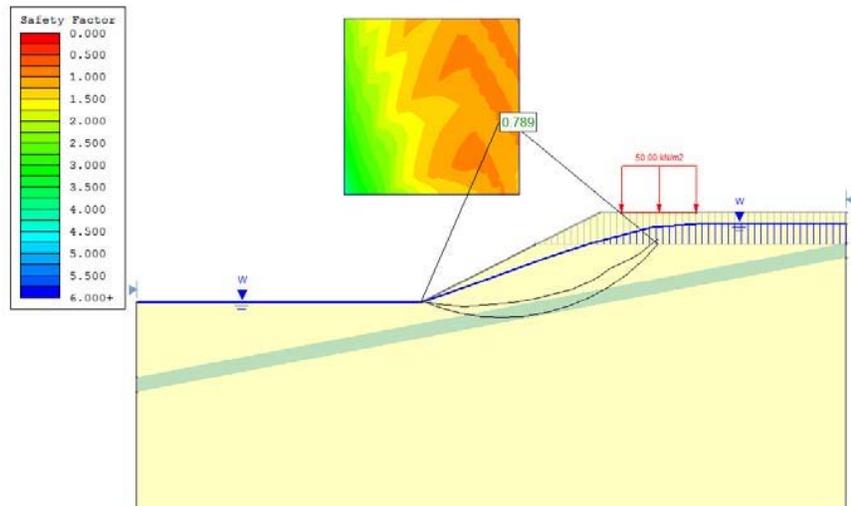
Guarde el modelo, utilizando la opción **Guardar Como** (“**Save As**”) en el menú **Archivo** (“**File**”). Usted puede elegir un nombre distinto para que pueda comparar los resultados de este modelo con los resultados del modelo sin fisuras por tensión.



Elija Computar (“Compute”) desde el menú **Análisis** (“**Analysis**”) para ejecutar el análisis y elija **Interpretar** (“**Interpret**”) desde el menú **Análisis** (“**Analysis**”) para visualizar los resultados.

Interpretar (“Interpret”)

Como antes, el programa Interpretar (“Interpret”) muestra los resultados del análisis Bishop Simplificado (“Bishop Simplified”). Cambie el gráfico a Spencer. Añada el eje de tracción **Búsqueda**→ **Mostrar Eje de Tracción** (“**Query** → **Show Line of Thrust**”) y los resultados deben lucir como siguen.

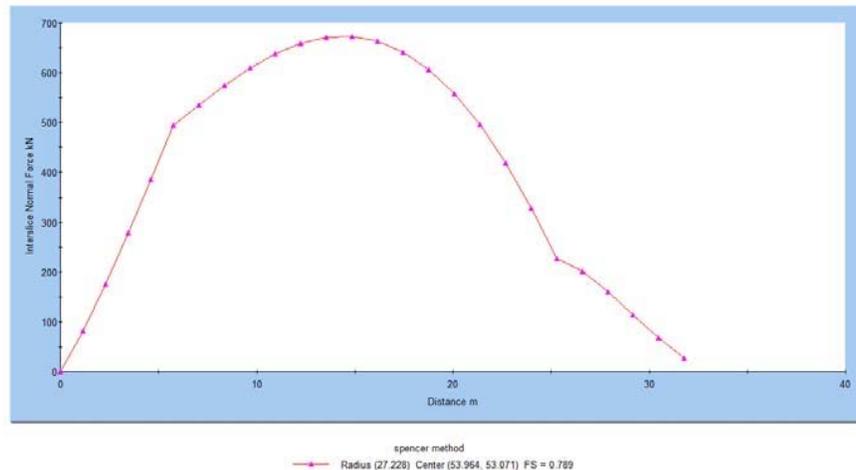


Este gráfico muestra varias diferencias importantes del ejemplo sin fisura por tensión:

- Cuando la superficie de falla intercepta el límite de fisura por tensión, se forma una fisura por tensión vertical que se extiende a la superficie del suelo.
- El eje de tracción se encuentra completamente dentro de la superficie de falla, lo que indica que no existe tensión en la masa del suelo.
- El factor de seguridad ha disminuido ligeramente en aproximadamente 0.79.

A pesar que la diferencia en el factor de seguridad es menor, en general es una buena práctica introducir una zona de fisura por tensión para los modelos, los cuales exhiben fuerzas de tracción entre cortes para obtener una superficie de falla más precisa y para eliminar posibles problemas numéricos de estabilidad. Para los modelos con zonas de tracción más extensas o fuerzas de tensión más amplias, es esencial ingresar una zona de fisura por tensión con el fin de obtener resultados realistas.

Si graficamos la fuerza normal entre cortes, tal como lo hicimos anteriormente, el gráfico indicará la existencia de fuerzas compresivas entre cortes para todos los cortes sin la presencia de tensión, tal como se muestra en la siguiente figura. Note que la fuerza normal en el último corte no es cero, esto se debe a la fuerza del agua hidrostática en la fisura por tensión. Si la zona de fisura por tensión estuviera seca, entonces la fuerza normal en el lado del último corte sería cero.



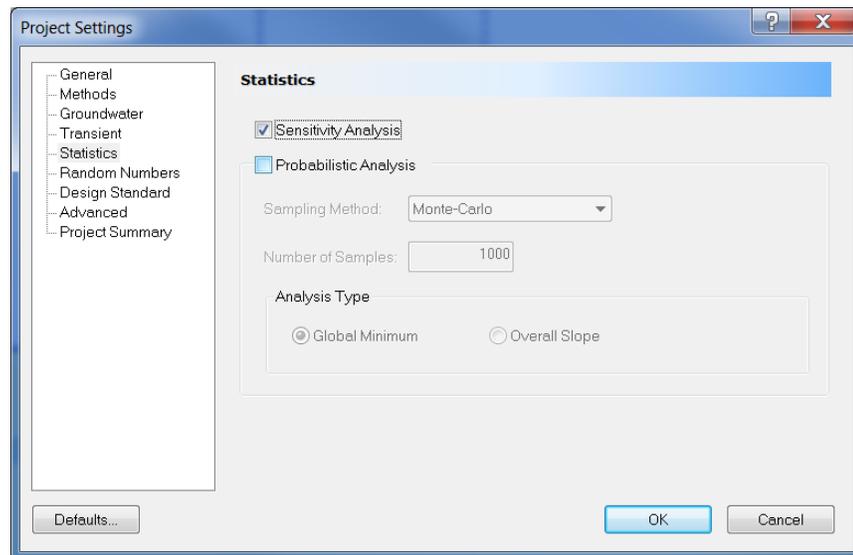
Análisis de sensibilidad de fisura por tensión

La profundidad de la fisura por tensión calculada de la ecuación 1 (4.3 m) elimina la tensión en el modelo; y por lo tanto, produce más resultados seguros. Existen muchas posibilidades válidas para la profundidad de fisura por tensión que eliminarán la tensión en el modelo. Ahora, deseamos determinar la profundidad de fisura por tensión que minimice el factor de seguridad. Podemos calcular esta profundidad, al utilizar un análisis de sensibilidad.



Regresemos al programa modelo del *Slide*. Eliminemos el límite de fisura por tensión, haciendo clic derecho sobre límite, y seleccionando Borrar Límite (“Delete Boundary”).

Abra los **Parámetros del Proyecto** (“**Project Settings**”) desde el menú **Análisis** (“**Analysis**”). Haga clic en Estadísticas (“**Statistics**”) en la parte izquierda y haga check en la casilla de Análisis de Sensibilidad (“**Sensitivity Analysis**”), tal como se muestra.

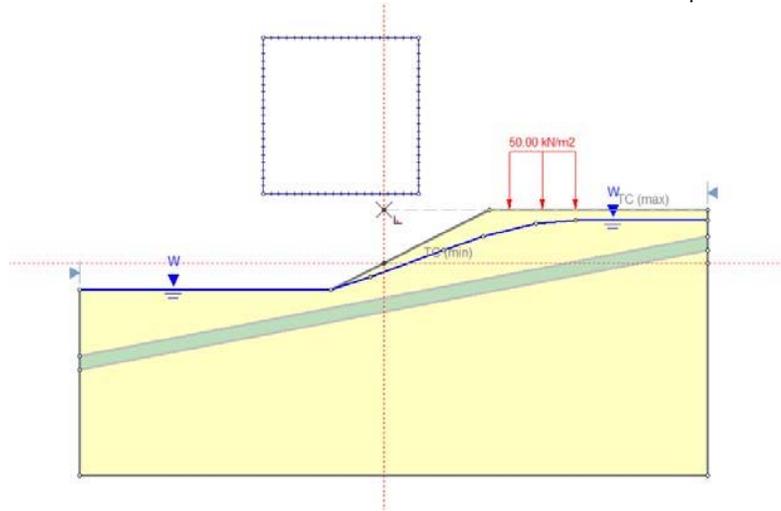


Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo.

Ahora, definiremos los límites superiores e inferiores de los límites de fisura por tensión, y el *Slide* probará 50 posibles ubicaciones de límite de fisura por tensión entre estos límites. Diríjase al menú Estadísticas (“**Statistics**”) y seleccione **Fisura por Tensión→ Graficar Fisura por Tensión Mínima** (“**Tension Crack→ Draw Min Tension Crack**”). Ingrese 100,32 para la coordenada derecha. Como antes, asegúrese que todas las opciones de captura están activadas, haga clic derecho en el mouse y active todas las opciones de captura.

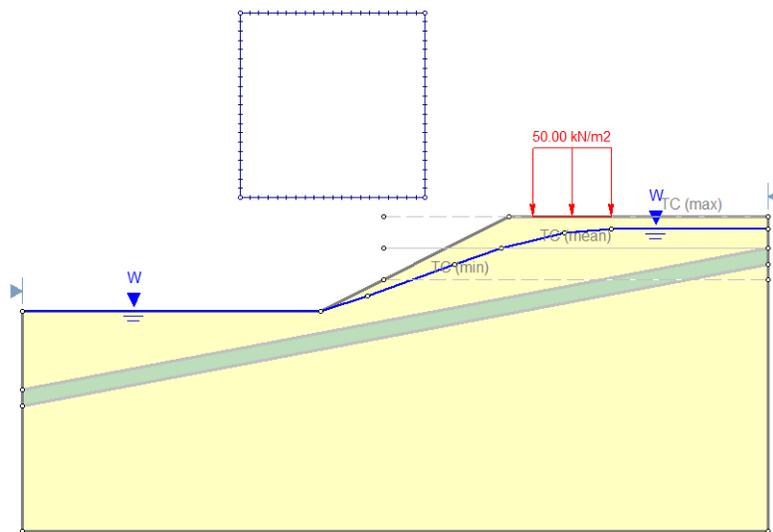
Grafique una línea horizontal que intercepte la superficie de la pendiente. Haga clic en el botón izquierdo del mouse en el punto de intersección. Presione Ingresar (“**Enter**”) para finalizar las entradas de puntos. Ahora usted ha delimitado el límite de fisura por tensión mínima (parte inferior).

Para graficar el (límite superior) máximo, diríjase nuevamente al menú **Estadísticas** (“**Statistics**”) y seleccione **Fisura por Tensión→ Graficar Fisura por Tensión Máx.** (“**Tension Crack → Draw Max Tension Crack**”). Haga clic en la esquina superior del modelo (100,40). Ahora, es importante que el límite superior se extienda en la misma distancia horizontal que el límite inferior. Por lo tanto, para obtener el segundo punto, mueva el cursor al punto izquierdo del límite inferior y reténgalo así por un segundo, *pero no haga clic!* Ahora verá una línea punteada roja que se extiende de forma vertical. Desplace hacia arriba la línea vertical, para que usted dibuje una línea horizontal, tal como se muestra.

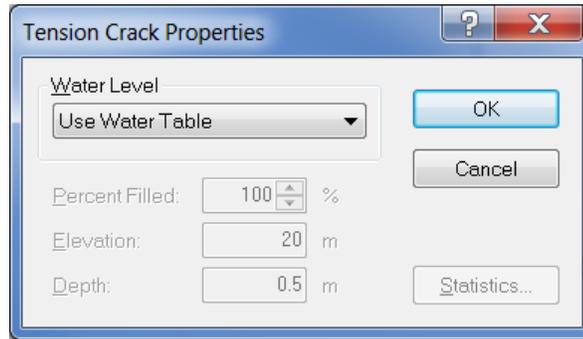


Haga clic en el botón izquierdo del mouse para establecer un punto directamente sobre el punto izquierdo en la parte inferior del límite. Presione Ingresar (“Enter”) para finalizar los puntos de entrada.

Usted verá los límites de fisura por tensión mínima, máxima y media, tal como se muestra.



Como antes, nosotros sólo queremos que la fisura por tensión sature debajo de la napa freática. Por lo tanto, diríjase al menú **Propiedades** (“**Properties**”), elija **Definir Fisura por Tensión** (“**Define Tension Crack**”). Configure el Nivel del Agua (“**Water Level**”) a Utilizar Napa Freática (“**Use Water Table**”).



Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo.

Computar (“Compute”)

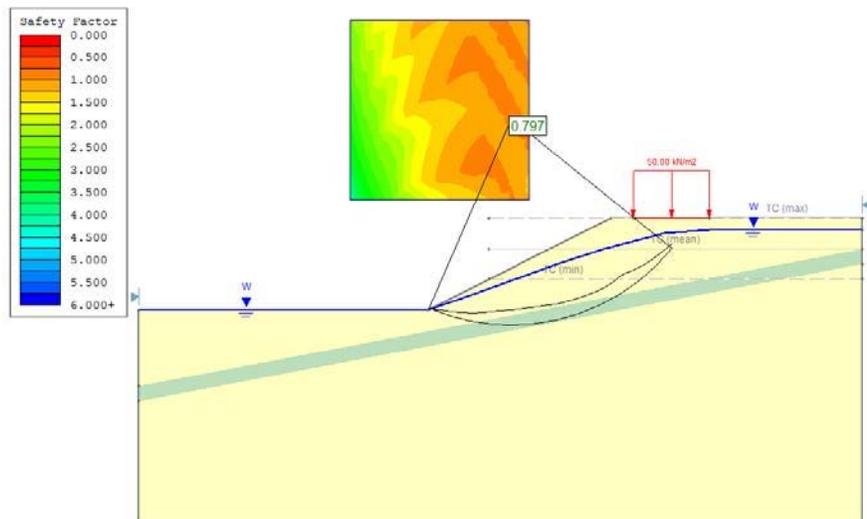


Guarde el modelo, utilice la opción Guardar Como (“Save As”) en el menú Archivo (“File”). Elija **Computar (“Compute”)** desde el menú **Análisis (“Analysis”)** para realizar el análisis y elija **Interpretar (“Interpret”)** desde el menú **Análisis (“Analysis”)** para visualizar los resultados.

Interpretar (“Interpret”)



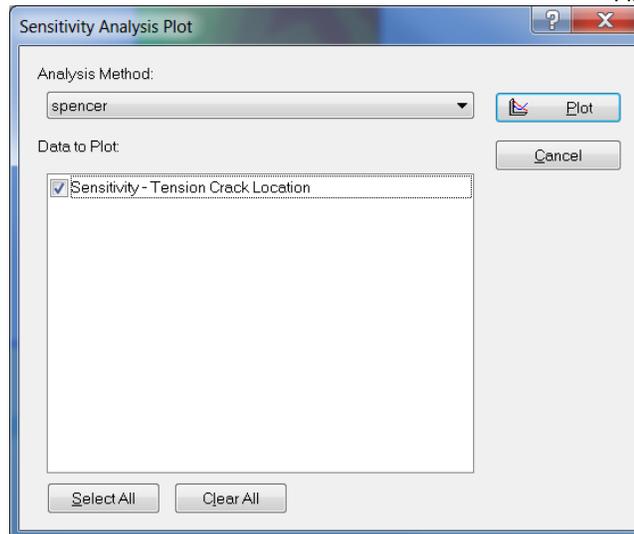
Como antes cambie el gráfico a Spencer y añada el eje de tracción **Búsqueda→Mostrar Eje de Tracción (“Query →Show Line of Thrust”)**. Los resultados deben lucir como lo siguiente:



El gráfico muestra los resultados para la ubicación de fisura por tensión media. Para el límite medio (en una profundidad de 4 m), el eje de tracción está completamente dentro de la masa deslizante que indica que no hay tensión, y el factor de seguridad es 0.797.

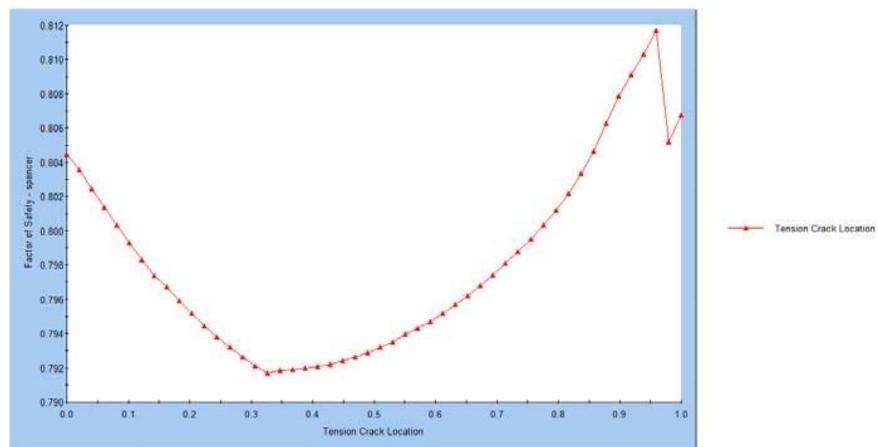


Para examinar los resultados del análisis de sensibilidad, diríjase al menú Estadísticas (“Statistics”) y elija **Gráfico de Sensibilidad (“Sensitivity Plot”)**. Elija el método de análisis Spencer y seleccione la casilla de selección para **Sensibilidad, ubicación de la Fisura por Tensión (“Sensitivity – Tension Crack Location”)** mediante la opción Datos para Gráfico.



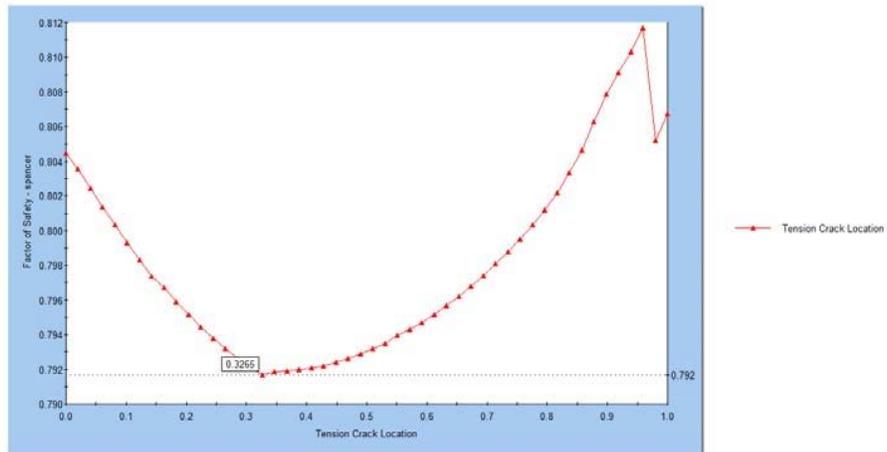
Haga clic en el botón Gráfico (“Plot”).

Usted verá el factor de seguridad graficado versus la ubicación del límite de fisura por tensión.



La ubicación del límite de fisura por tensión está definida como una fracción de la distancia desde el mínimo (32 m) hasta el máximo (40 m). El gráfico muestra una mínima clara en un valor de aproximadamente 0.325. Esto, por lo tanto, corresponde a la coordenada $-y$ de aproximadamente 34.6 m, y por ende a una profundidad de aproximadamente 5.4 m.

Para obtener valores más precisos del gráfico, usted puede utilizar las opciones de Muestrario (“Sampler”). Por ejemplo, haga clic en el botón derecho sobre el cuadro y elija la opción **Muestrario** (“**Sampler**”). Nuevamente, haga clic derecho y asegúrese de seleccionar la opción Muestrario Horizontal (“Horizontal Sampler”). Ahora, haga clic y arrastre la línea punteada horizontal (muestrario) a la parte inferior del gráfico. Se señala que la ubicación de fisura por tensión mínima del FDS es de 0.3265, tal como se muestra en la siguiente figura.



Se puede obtener el factor de seguridad mínimo, al utilizar el Muestrario (“Sampler”). Haga clic derecho en el gráfico y seleccione el Muestrario Vertical (“Vertical Sampler”). Haga clic sobre el punto mínimo y usted verá que el factor de seguridad es igual a 0.7917.

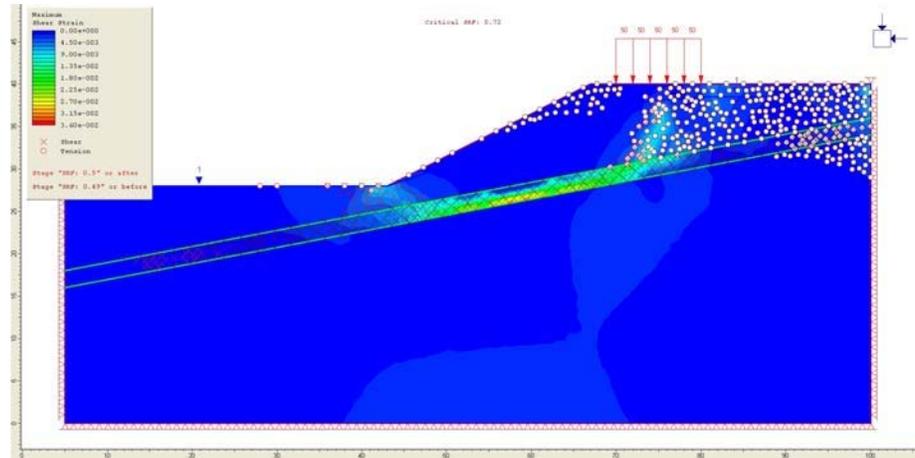
Para resumir, la profundidad de fisura por tensión, la cual minimiza el factor de seguridad para este modelo es de aproximadamente 5,4, tal como está determinado por el análisis de sensibilidad. Esto representa aproximadamente 1 metro más que la profundidad proporcionada por la Ecuación 1 (“Equation 1”) (4,3 metros) y la profundidad estimada de 4,5 metros, basados en las fuerzas de tracción entre cortes del modelo original.

Esto concluye el tutorial de Fisura por Tensión (“Tension Crack”).

Ejercicios Adicionales

Se puede llevar a cabo el mismo análisis en la *Fase 2* (un programa de elemento finito de Rocscience), utilice el método de Reducción de Resistencia al Corte (“Shear Strength Reduction”). Inicie la *Fase 2* e importe el archivo *Slide* del Tutorial 2. Configure el número de elementos a 1800 durante el proceso de importación. Realice el análisis.

El siguiente gráfico muestra los resultados del Factor de Reducción al Corte crítico (“Strength Reduction Factor”) de 0,72. Los círculos blancos indican la falla de tracción. Usted puede ver que la zona de falla de tracción varía entre 6 a 9 metros de profundidad aproximadamente. El Factor de Seguridad (“Factor of Safety”) (asume ser igual al Factor de Reducción al Corte crítico (“Strength Reduction Factor”)) es menor que el obtenido por el *Slide*. Esto se debe a que la superficie de falla no está limitada a ser circular. Esta es no circular y se ejecuta a través de la capa débil, tal como se muestra por los contornos de tensión al corte. Si se especificase una superficie de falla no circular en el *Slide*, entonces se produciría un factor de seguridad similar.



Referencias

Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. y Boyce, G.M., 2002. *Slope stability and stabilization methods*, segunda edición, John Wiley & Sons Inc., Nueva York.

Duncan, J.M. y Wright, S.G., 2005. *Soil strength and slope stability*, John Wiley & Sons Inc., Nueva York.