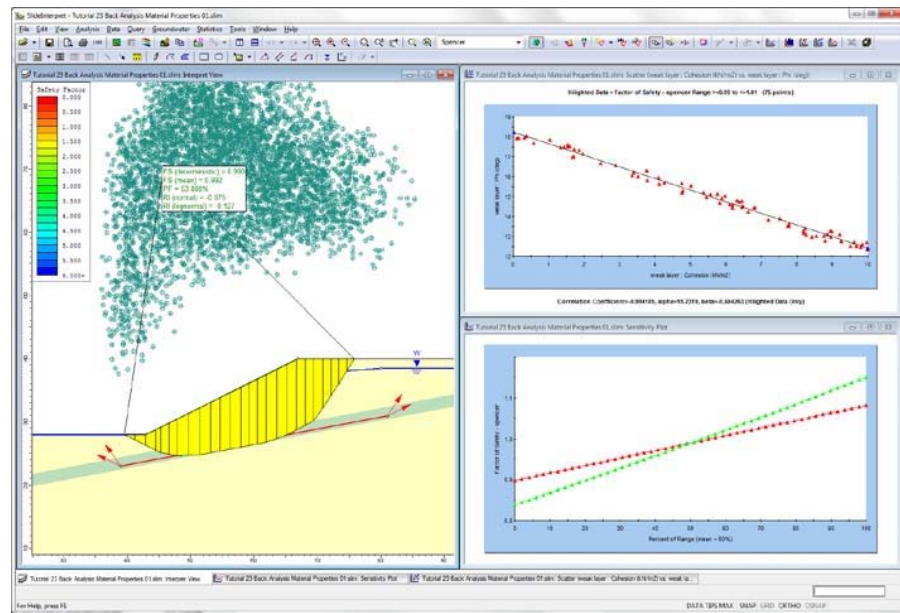


# Análisis Inverso de Propiedades del Material

Este tutorial demostrará cómo realizar el análisis inverso de las propiedades del material, al utilizar las características del análisis probabilístico o de sensibilidad en el *Slide*. Se puede utilizar el análisis inverso para determinar la resistencia del material en la falla del talud, o la resistencia del material requerida para alcanzar un factor de seguridad determinado.

Se puede utilizar el análisis de sensibilidad para el análisis inverso de variables individuales, y el análisis probabilístico para el análisis inverso de variables múltiples.



Temas desarrollados:

- Talud con superficie de falla conocida
- Análisis de sensibilidad
- Análisis probabilístico
- Análisis inverso de resistencia del material

Se puede encontrar el producto terminado de este tutorial en el archivo de datos **Tutorial 23 Análisis Inverso Propiedades del Material.slim** (“**Tutorial 23 Back Analysis Material Properties.slim**”). 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*.

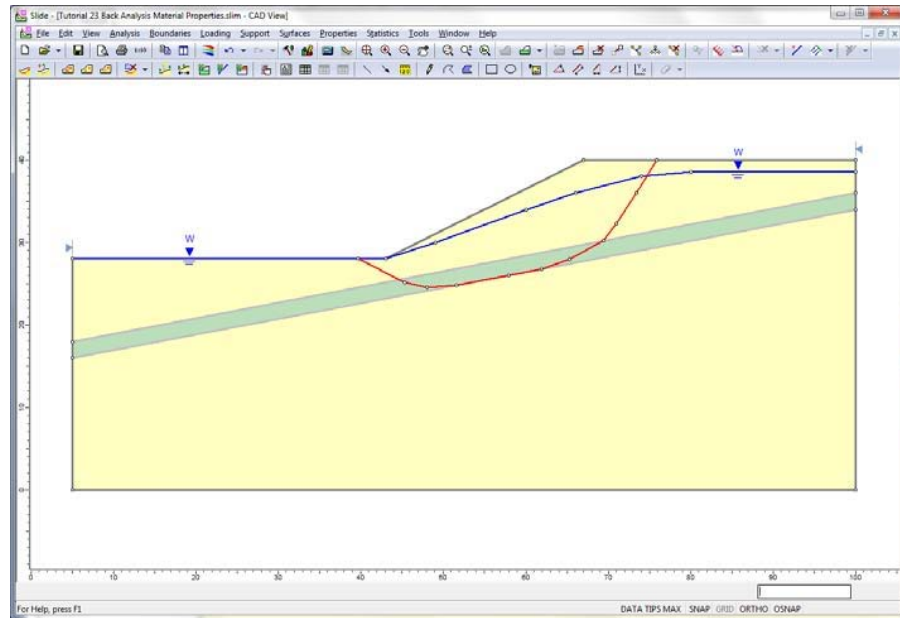
Nota: si usted no está familiarizado con las opciones del análisis de sensibilidad o probabilístico en el *Slide*, se recomienda que revise primero los tutoriales del *Slide*, 8, 9, 10 y 11.

## Modelo (“Model”)



Inicie el programa Modelo (“Model”) del *Slide*. Seleccione Archivo > Carpetas Recientes> Carpeta de Tutoriales (“File > Recent Folders > Tutorials Folder”) del menú principal del *Slide* y abra el archivo **Tutorial 23 Análisis Inverso Propiedades del Material.slim** (“**Tutorial 23 Back Analysis Material Properties.slim**”).

Usted debe ver el siguiente modelo.



Para este modelo, se asume que ocurre una falla de desplazamiento del talud. La superficie de la falla existente viene determinada mediante la línea roja mostrada en la figura anterior. La superficie de falla es no circular y pasa a través de una capa de material débil (material verde).

El material sobre y bajo la capa débil (material amarillo) es significativamente más fuerte que la capa débil y tiene las siguientes propiedades de resistencia: cohesión = 17.5 kPa y ángulo de fricción = 30 grados.

Asignaremos primero las propiedades de resistencia a la capa débil: cohesión = 5 kPa y el ángulo de fricción = 15 grados. Primero, ejecutemos el análisis con estas propiedades para ver los resultados.

## Computar (“Compute”)



Seleccione la opción Computar (“Compute”).

Seleccione: Análisis → Computar (“Select: Analysis → Compute”)

Es instantáneo definir el cálculo, debido a que sólo hay una superficie de falla única.

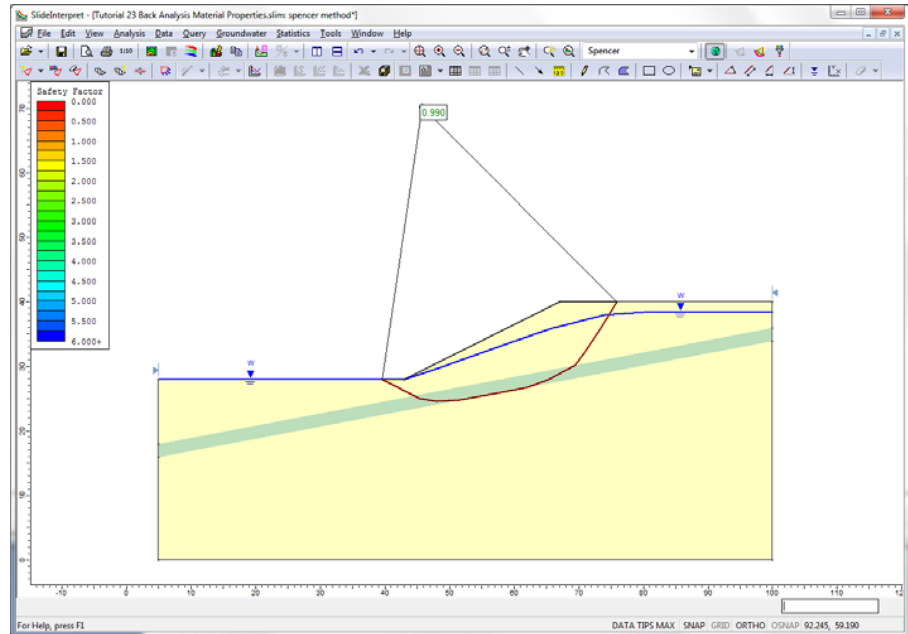
## Interpretar (“Interpret”)



Para visualizar los resultados del análisis:

Seleccione: Análisis → Interpretar (“Select: Analysis → Interpret”)

Esto iniciará el programa Interpretar (“Interpret”) del *Slide*. Usted debe ver lo siguiente.



Para el método de análisis Spencer, el factor de seguridad de esta superficie de falla es 0.99. Esto es consistente con la superficie de falla existente, ya que el factor de seguridad es aproximadamente 1.

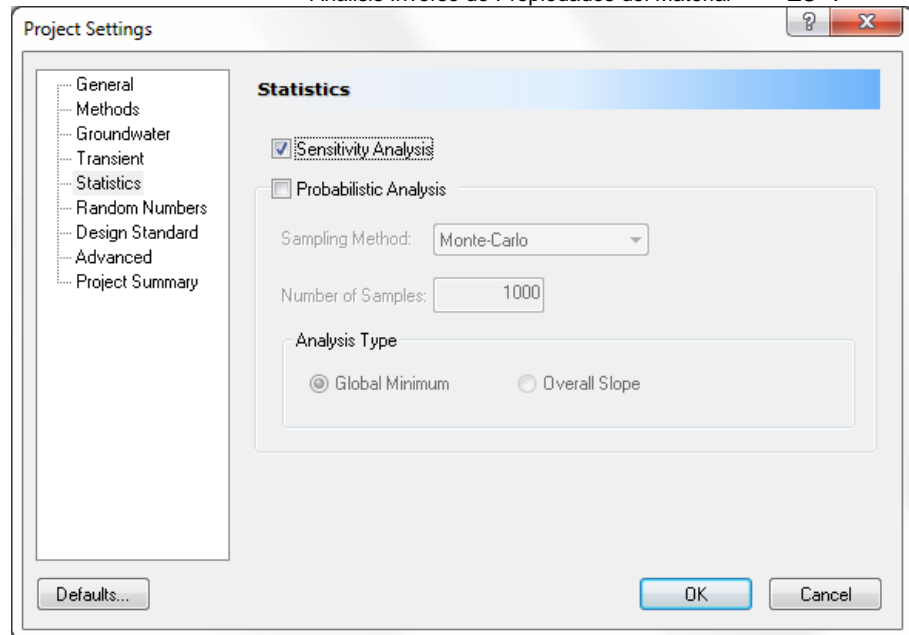
Hemos obtenido este resultado, al utilizar los valores específicos de cohesión y ángulo de fricción para ambos materiales (material fuerte y capa débil).

En el contenido restante de este tutorial demostraremos como podemos utilizar el análisis probabilístico o de sensibilidad, para llevar a cabo el análisis inverso de las propiedades del material, suponiendo que uno o más parámetros de resistencia del material son desconocidos.

## Análisis de sensibilidad (“Sensitivity Analysis”)

Regrese al programa Modelo (“Model”) del *Slide*.

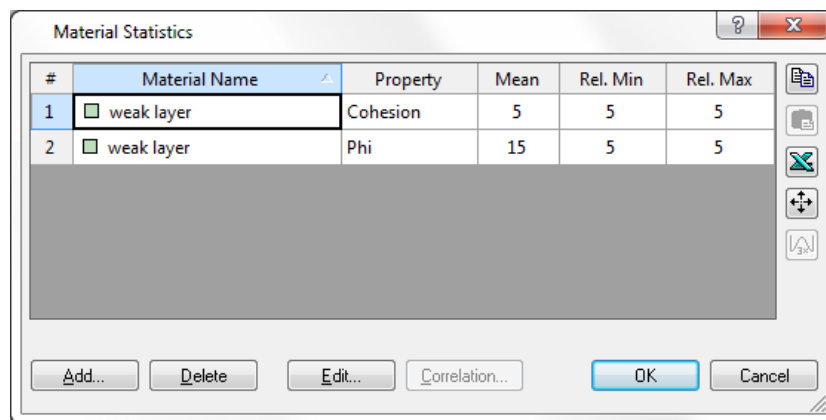
Seleccione Parámetros del Proyecto (“Project Settings”) y seleccione la opción Estadísticas (“Statistics”) en la ventana de diálogo Parámetros del Proyecto (“Project Settings”). Note que la opción Análisis de Sensibilidad (“Sensitivity Analysis”) (casilla de selección) ya está seleccionada.



Seleccione OK o Cancelar (“Cancel”), ya que no haremos ningún cambio ahora.

## **Estadísticas del Material (“Material Statistics”)**

Ahora, seleccione la opción Materiales (“Materials”) desde el menú Estadísticas (“Statistics”). Usted verá lo siguiente.



Para este ejemplo, hemos definido previamente dos variables para un análisis de sensibilidad:

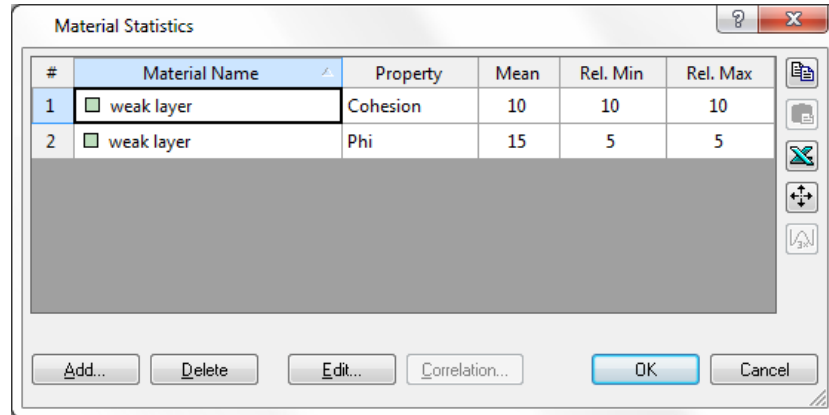
- Cohesión de la capa débil
- Ángulo de fricción de la capa débil

NOTA: los valores medios actualmente definidos de cohesión y ángulo de fricción (5 kPa y 15 grados) resultan en un factor de seguridad de 0.99 para la superficie de falla determinada. Para este ejemplo, los valores ya fueron previamente determinados.

Ahora, supongamos que los parámetros de resistencia del material de la capa débil NO son completamente conocidos. Para comenzar, supongamos que la cohesión es desconocida, pero que el ángulo de fricción es conocido (15 grados). ¿Cómo determinaremos el valor de cohesión de capa débil?

Al utilizar el análisis de sensibilidad, y el hecho de que tenemos una superficie de falla conocida (factor de seguridad = 1), podemos determinar fácilmente un valor de cohesión de la capa débil en la falla.

Primero, cambiemos un poco los números. Dado que suponemos que la cohesión es desconocida, si este fuera un talud real, nosotros podríamos predecir inicialmente el rango de valores posibles. En la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”), ingrese un valor medio = 10 kPa y los valores relativos mínimos y máximos = 10 kPa. Esto efectivamente variará la cohesión entre 0 y 20 kPa para el análisis de sensibilidad.

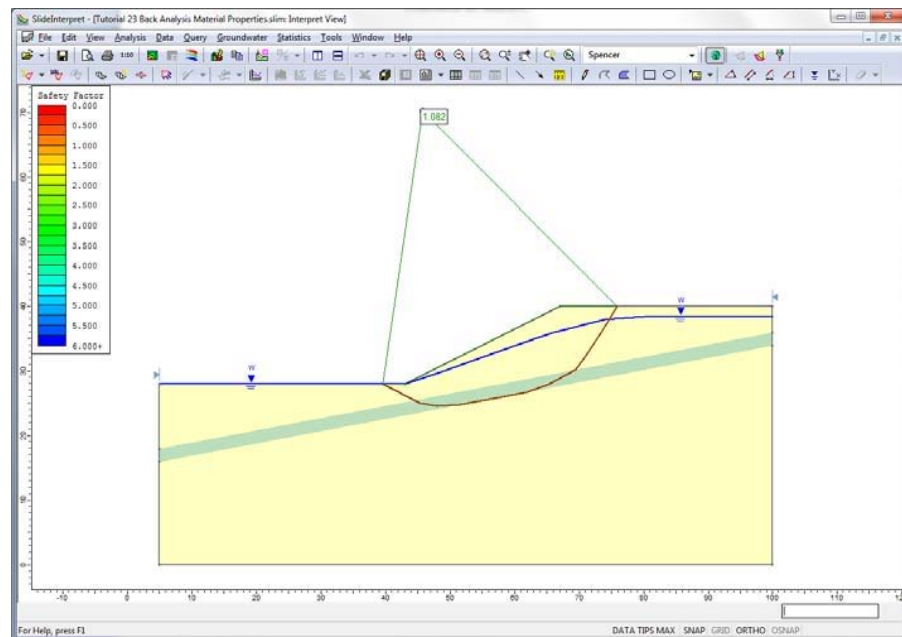


Seleccione OK en la ventana de diálogo.

Seleccione Computar (“Compute”) y seleccione Interpretar (“Interpret”). Usted debe ver el siguiente resultado.

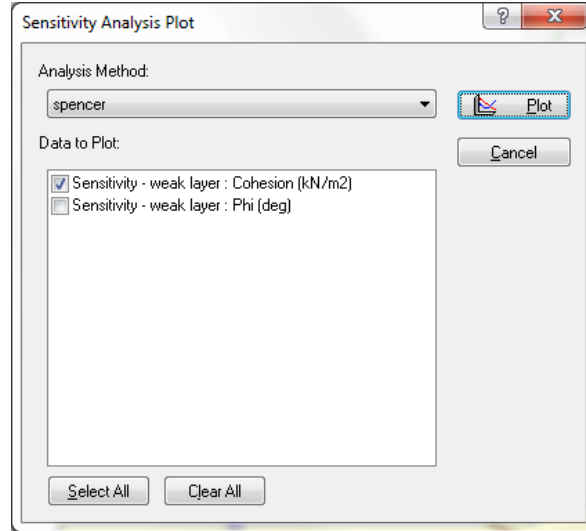
## **Interpretar (“Interpret”)**

Note que el factor de seguridad es ahora 1.082. Esto se debe a que hemos cambiado la cohesión media de 5 kPa a 10 kPa.

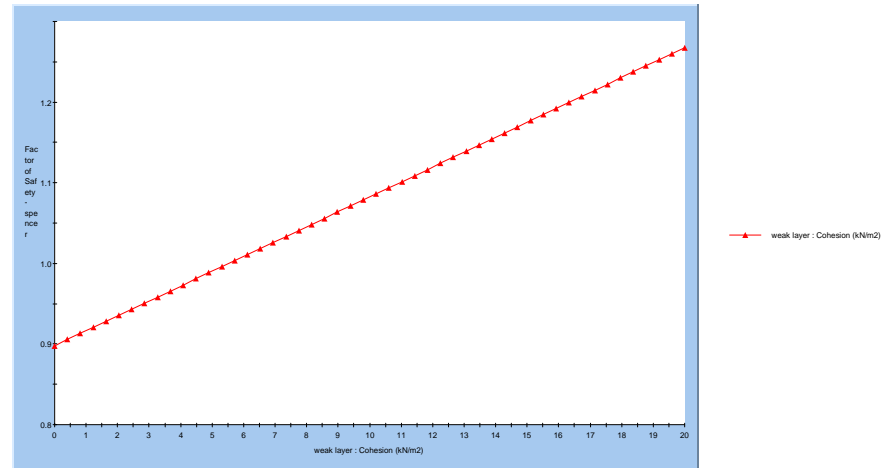


Debido a que todos los parámetros de los valores medios son utilizados para calcular el factor de seguridad determinístico durante un análisis probabilístico o de sensibilidad, cualquier cambio en los valores medios afectará el factor de seguridad determinístico.

Ahora, seleccione la opción Gráfico de Sensibilidad (“Sensitivity Plot”) desde el menú Estadísticas (“Statistics”) o la barra de herramientas. Asegúrese que sólo la casilla de selección Cohesión (“Cohesion”) esté seleccionada y que la casilla de selección ángulo de fricción se haya dejado en blanco, tal como se muestra a continuación.



Seleccione el botón Gráfico (“Plot”), usted debe ver el siguiente gráfico de sensibilidad. Como puede observar, se varió la cohesión entre 0 y 20 kPa, y como consecuencia el factor de seguridad cambió.



Deseamos saber el valor de cohesión, el cual corresponde al factor de seguridad = 1. Podemos hacer esto como sigue. Haga clic derecho en el gráfico y seleccione Muestrear el Valor Exacto (“Sample Exact Value”) desde el menú emergente. Ingrese el valor del factor de seguridad = 1, tal como se muestra a continuación y seleccione OK.

**Sample Exact Value**

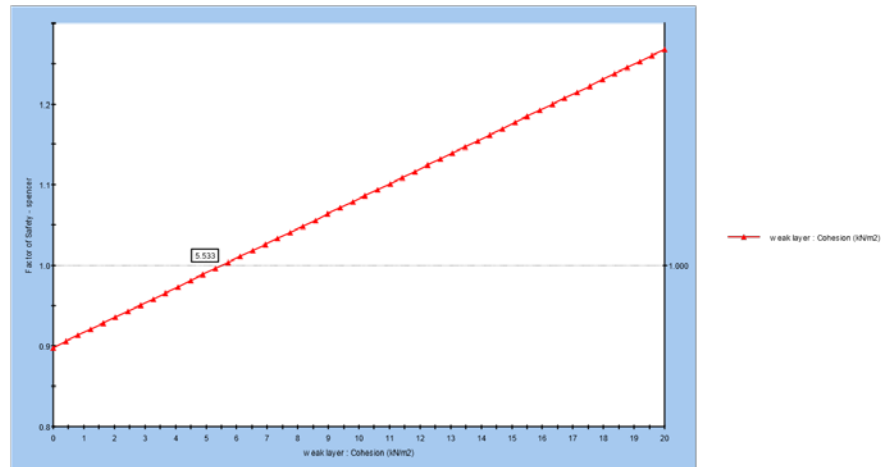
Horizontal Axis  
 weak layer : Cohesion (kN/m2)  
 Snap to Line 1

Vertical Axis  
 Factor of Safety - spencer  
 Specify Value 1

Lock Sampler Position

OK Cancel

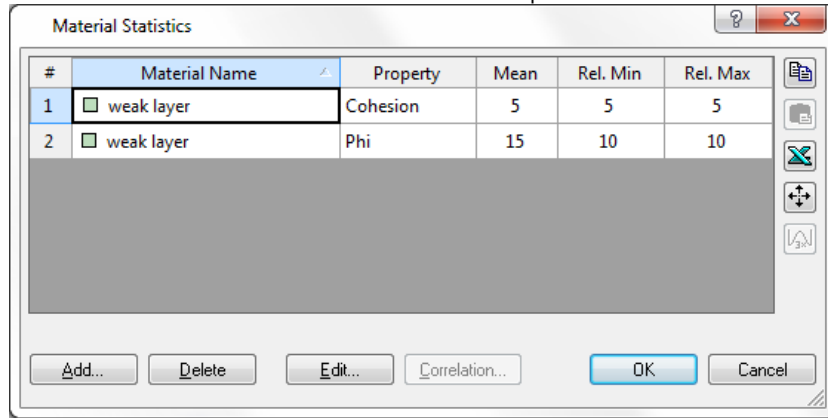
El gráfico de sensibilidad mostrará el valor exacto de cohesión para el factor de seguridad = 1. Un valor de cohesión de la capa débil = 5.5 kPa, corresponde al factor de seguridad = 1. Esto asume que todos los parámetros del talud son exactamente conocidos e iguales a sus valores medios (esto es, para un ángulo de fricción = 15 grados, la cohesión en la falla = 5.5 kPa).



Ahora, supongamos que la cohesión es conocida y que el ángulo de fricción es desconocido.

### **Modelo (“Model”)**

Regrese al programa Modelo (“Model”) del *Slide*. Seleccione Materiales (“Materials”) desde el menú Estadísticas (“Statistics”) e ingrese los siguientes valores.

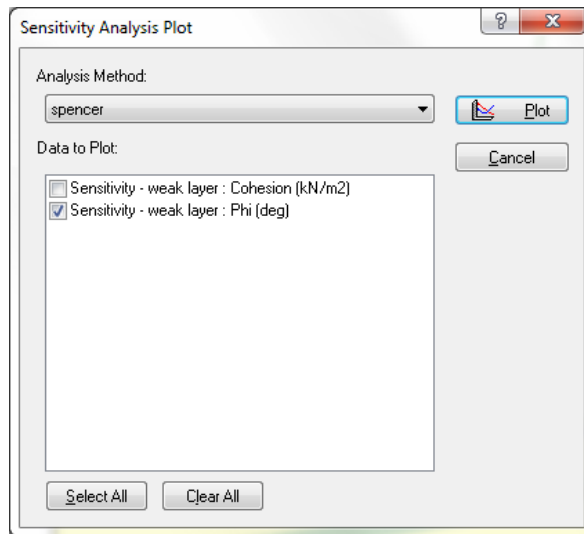


Seleccione OK en la ventana de diálogo.

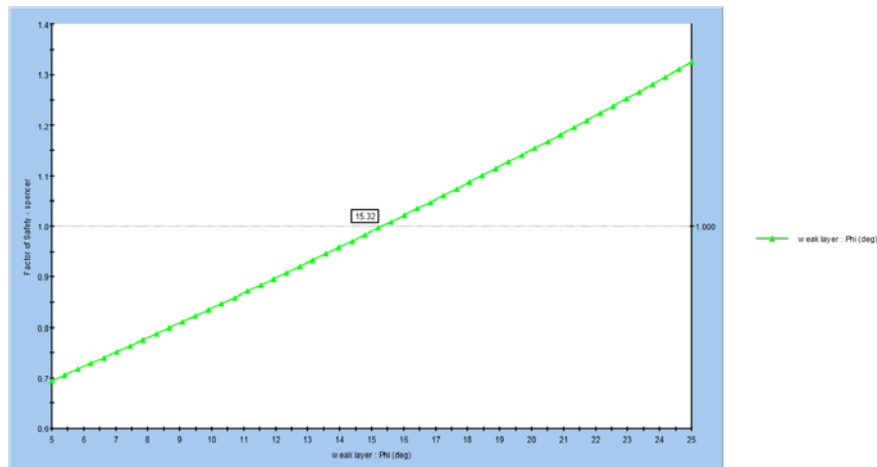
Seleccione Computar (“Compute”) e Interpretar (“Interpret”).

### **Interpretar (“Interpret”)**

Seleccione Gráfico de Análisis de Sensibilidad (“Sensitivity Analysis Plot”) y grafique sólo el ángulo de fricción.



Seleccione el botón Gráfico (“Plot”), usted debe ver que el gráfico de sensibilidad con el ángulo de fricción varían entre 5 y 25 grados. Haga clic derecho en el gráfico y seleccione Muestrear Valor Exacto (“Sample Exact Value”), ingrese un factor de seguridad = 1 y seleccione OK.





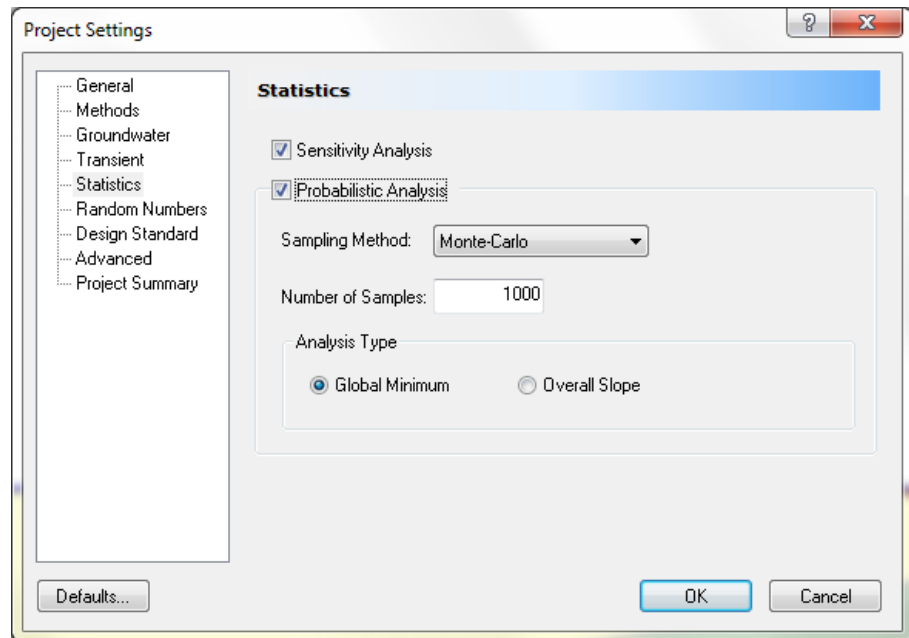
Un ángulo de fricción = 15.3 grados proporciona un factor de seguridad = 1. Esto asume que todos los otros parámetros son iguales a sus valores medios (esto es, cohesión = 5 kPa).

Para resumir: se puede utilizar fácilmente el análisis de sensibilidad para el análisis inverso de variables individuales. Sólo recuerde, cuando usted visualice un gráfico de sensibilidad de una variable individual, se supone que todos los otros análisis son constantes e iguales a sus valores medios. En general, este procedimiento podría requerir algún ensayo y error, por ejemplo si el factor de seguridad solicitado no está dentro del rango de salida de datos del gráfico de sensibilidad, usted deberá ajustar el rango aceptable de valores de la variable y volver a ejecutar el análisis.

## **Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”)**

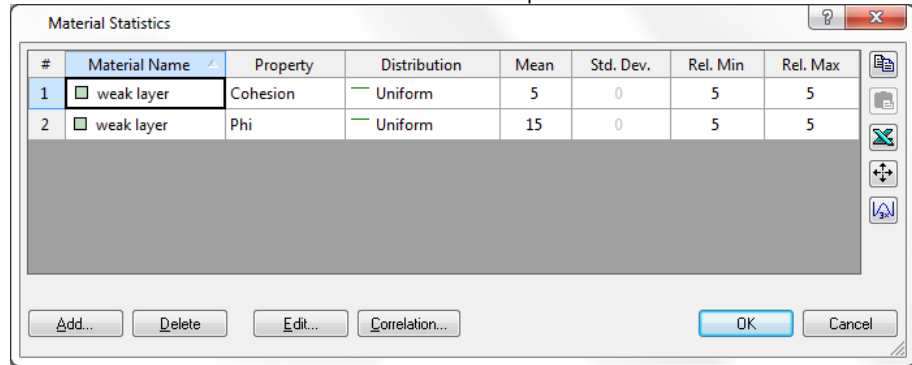
Se puede utilizar la opción análisis probabilístico en el *Slide* para llevar a cabo el análisis inverso de dos variables simultáneas. Por ejemplo, determinar todos los valores posibles de cohesión Y ángulo de fricción por un factor de seguridad específico.

Regrese al programa Modelo (“Model”) del *Slide* y seleccione Parámetros del Proyecto (“Project Settings”). Diríjase a la opción Estadísticas (“Statistics”) y regrese a la casilla de selección Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”). Seleccione OK.



## **Estadísticas del Material (“Material Statistics”)**

Seleccione Estadísticas del Material (“Material Statistics”) desde el menú Estadísticas (“Statistics”). Dado que estamos llevando a cabo el análisis probabilístico (además del análisis de sensibilidad), note que hay dos entradas de datos requeridas para cada variable: Distribución (“Distribution”) y Deviación Estándar (“Standard Deviation”).



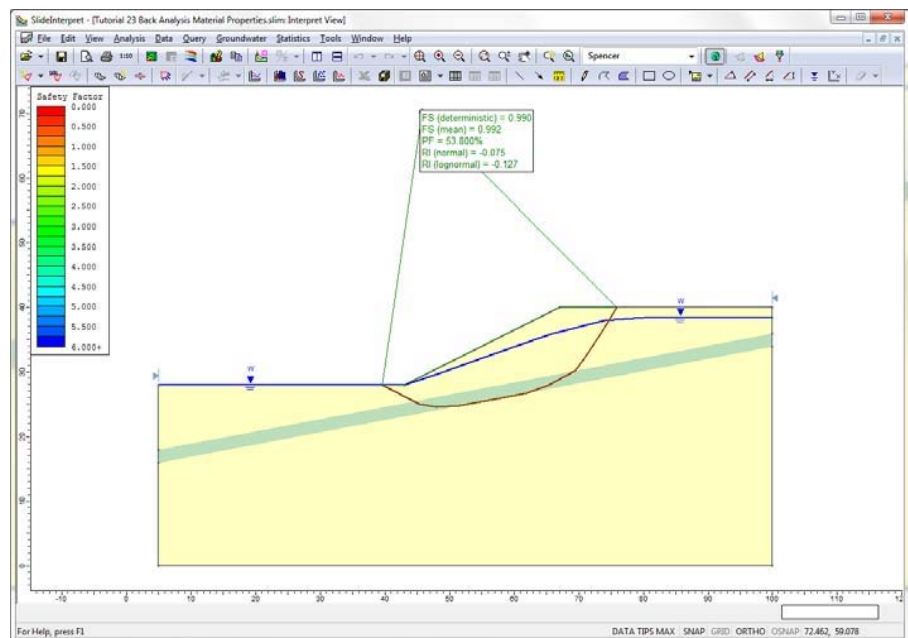
Utilizaremos una Distribución Uniforme (“Uniform Distribution”) para ambos, cohesión y ángulo de fricción. Debido a que suponemos que AMBOS cohesión y ángulo de fricción son variables desconocidas, una distribución Uniforme (“Uniform”) asegurará que las muestras aleatorias sean generadas de forma uniforme sobre el rango completo de cada variable.

Note que para una distribución Uniforme (“Uniform”), la Desviación Estándar (“Standard Deviation”) no es aplicable, y que por lo tanto está inhabilitada. Asegúrese de que los valores, medios, mínimos y máximos sean mostrados (cohesión, 5,5,5 y el ángulo de fricción 15,5,5). Seleccione OK.

Seleccione Computar (“Compute”) y luego Interpretar (“Interpret”).

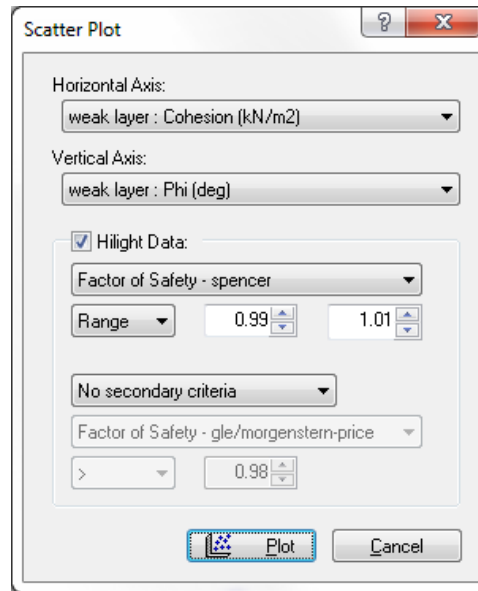
## **Interpretar (“Interpret”)**

Usted debe ver los siguientes resultados. Note que el factor de seguridad determinístico es aún 0.99. Asimismo, se lista un resumen de resultados probabilísticos (PF=probabilidad de falla=53.8%, esto es, más de la mitad de todos los resultados dan como resultado la falla del talud. Esto es como se esperaba, ya que la distribución del factor de seguridad está centrada aproximadamente en el valor medio de 1).

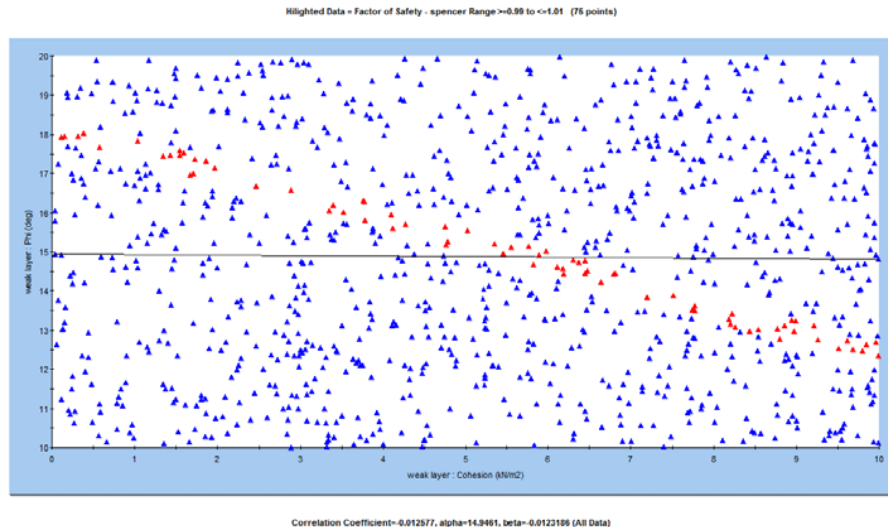


Ahora, seleccione la opción Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) desde el menú Estadísticas (“Statistics”).

En la ventana de diálogo Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) haga las siguientes selecciones. Grafique la Cohesión (“Cohesion”) de la capa débil versus  $\Phi$  (“Phi”). Seleccione la casilla de selección Resaltar Datos (“Highlight Data”). Seleccione el Factor de Seguridad (“Factor of Safety”) - Spencer. Seleccione la opción Rango (“Range”) y configure un rango de 0.99 a 1.01. Seleccione el botón Gráfico (“Plot”).



Usted debe ver el siguiente gráfico de dispersión (“Scatter Plot”).

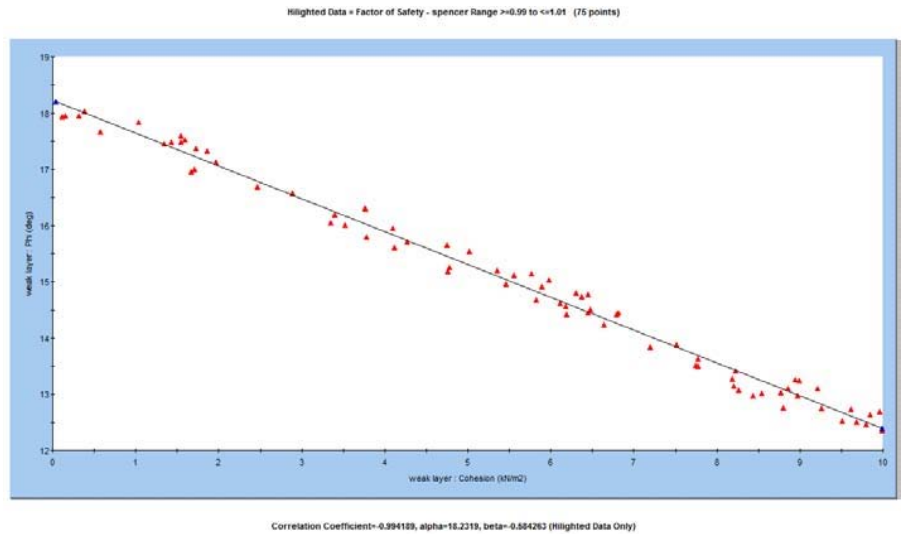


Dado que elegimos una distribución Uniforme (“Uniform”) para ambos Cohesión (“Cohesion”) y  $\Phi$  (“Phi”), y no utilizamos la Correlación (“Correlation”), usted puede observar que las muestras se han generado de forma uniforme en todo el rango específico de ambas variables (esto es, cohesión de 0 a 10 y ángulo de fricción de 10 a 20).

Note que los puntos de datos están resaltados en rojo. Esto representa pares de cohesión y ángulo de fricción, lo cual resulta en un factor de seguridad entre 0.99 y 1.01 (como lo especificamos en la ventana de

diálogo de dispersión).

Para visualizar solo los datos resaltados, haga clic derecho en el gráfico y seleccione Resaltar Sólo Datos (“Highlighted Data Only”) desde el menú emergente. El gráfico debe lucir como sigue

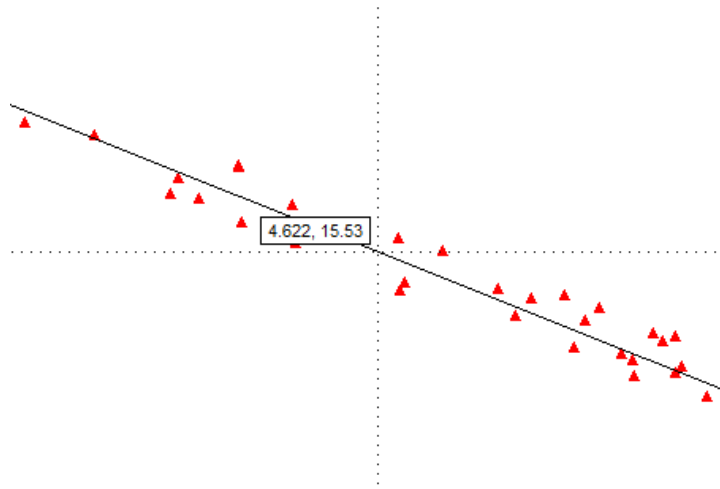


Este gráfico muestra la relación entre la cohesión y el ángulo de fricción para un factor de seguridad de aproximadamente 1. Como puede ver, la relación es lineal sobre el rango de valores graficados, para este ejemplo.

Los parámetros de la línea de mejor ajuste lineal a través de los datos resaltados, son proporcionados en la parte inferior del gráfico. El parámetro alfa es el intercepto -y-, y beta es el talud de la línea. En este caso:

$$\text{Ángulo de fricción} = -0.58 \text{ cohesión} + 18.2$$

Usted puede utilizar esta ecuación para determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción sobre este rango de valores. Asimismo, usted puede hacer esto de forma gráfica con el muestrario. Si usted hace clic derecho sobre el gráfico y selecciona Agregar (“Snap”) el muestrario a la línea (coordenada -x) o (coordenada -y), usted puede gráficamente arrastrar el muestrario a lo largo de la línea con el mouse, y las coordenadas (cohesión, fi) se mostrarán de forma interactiva, tal como se muestra.



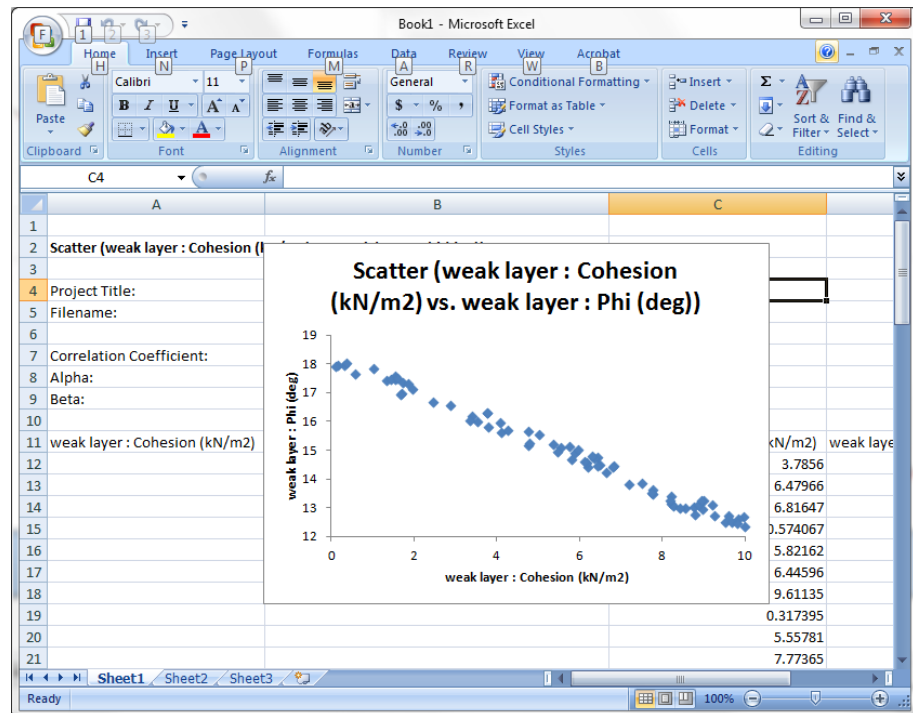
Cualquier par de valores de cohesión y ángulo de fricción, que caen en esta línea, deben proporcionarle un factor de seguridad de aproximadamente 1. Por ejemplo: al utilizar el muestreo, podemos determinar que el par de datos de cohesión = 2 y ángulo de fricción = 17 caen en esta línea. Si usted ingresa estos datos como la resistencia de la capa débil y vuelve a ejecutar el análisis, usted verá que el factor de seguridad es en efecto =1.

A pesar que la relación es lineal en este ejemplo, esto no será siempre el caso. De acuerdo al rango de valores, las variables graficadas y la naturaleza de su modelo, un gráfico de dispersión podría exhibir cualquier tipo de relación funcional entre las dos variables.

Se puede utilizar el procedimiento anterior para cualquier rango de factor de seguridad. Por ejemplo, si usted desea encontrar valores de cohesión y ángulo de fricción, que correspondan a algún otro valor del factor de seguridad, simplemente delimite un pequeño rango que encuadre el factor de seguridad (ej. 1.19 a 1.21), al utilizar la opción Resaltar Datos (“Highlight Data”) en la ventana de diálogo gráfico de Dispersión (“Scatter”).

## **Exportar a Excel**

Si usted desea realizar un proceso posterior de datos con otras aplicaciones, usted puede fácilmente exportar los datos a Excel. Por ejemplo, haga clic derecho en gráfico de Dispersión (“Scatter”) y seleccione Gráfico (“Plot”) en Excel desde el menú desplegable y se exportará de forma automática el gráfico y los datos al Excel.



## **Análisis Inverso de Otras Variables**

En este tutorial solo hemos revisado el análisis inverso de los parámetros de resistencia del material, en particular, la cohesión y ángulo de fricción de un material Mohr-Coulomb.

En el *Slide*, se pueden definir casi todas las variables en un análisis probabilístico o de sensibilidad. En este tutorial, se pueden aplicar los procedimientos descritos a otros parámetros de resistencia y modelos de resistencia (ej. Hoek- Brown o materiales anisótropos) o a cualquier otro parámetro de entrada de datos aleatorio en el *Slide* (ej. Propiedades de apoyo). El usuario puede experimentar con las opciones disponibles.

## **Análisis Inverso (“Back Analysis”) de Variables Múltiples (“Multiple Variables”)**

Los procedimientos del análisis inverso que involucran más de dos variables han sido descritos para problemas de estabilidad de talud. Sin embargo, esto está más allá del alcance de este tutorial. Las futuras versiones del *Slide* podrían implementar métodos de análisis inversos para el análisis simultáneo de más de dos variables.

Esto concluye el tutorial del análisis inverso de las propiedades del material. Ahora, usted puede salir del programa.