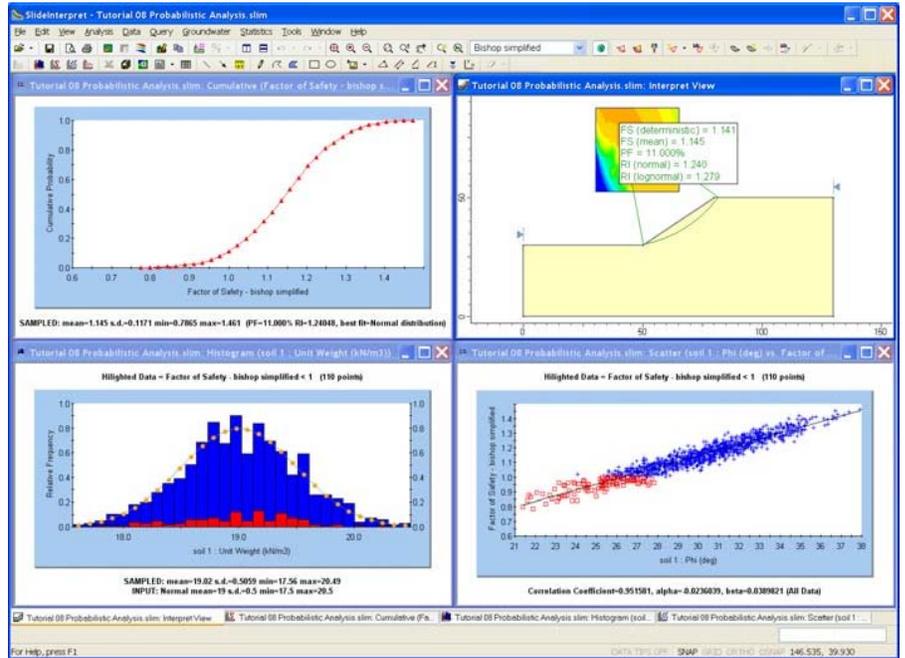


Análisis Probabilístico



Este tutorial tiene el propósito de familiarizar al usuario con las capacidades básicas de análisis probabilístico del *Slide*.

Asimismo, demostrará cuán rápido y fácilmente se puede realizar con el *Slide*, un análisis probabilístico de resistencia de un plano inclinado a fallar por deslizamiento o colapso.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO:

- talud homogéneo, de material simple
- no hay presión de agua (seco)
- análisis de superficie de deslizamiento circular (Búsqueda por cuadrículas)
- variables aleatorias: cohesión, phi y peso unitario
- tipo de análisis probabilístico: Mínimo Global

El producto terminado de este tutorial puede encontrarse en el archivo de datos **Tutorial 08 Análisis Probabilístico.slim** (“**Tutorial 08 Probabilistic Analysis.slim**”). Se pueden acceder a todos los archivos de la guía de usuarios instalados con *Slide 6.0*, al seleccionar Archivo > Carpetas Recientes > Folder de Tutoriales (File > Recent Folders > Tutorials Folder) del menú principal del *Slide*.

Modelar (“Model”)

Este tutorial estará basado en el mismo modelo utilizado para el Tutorial 1, de modo que ingresemos primero el archivo del Tutorial 1.

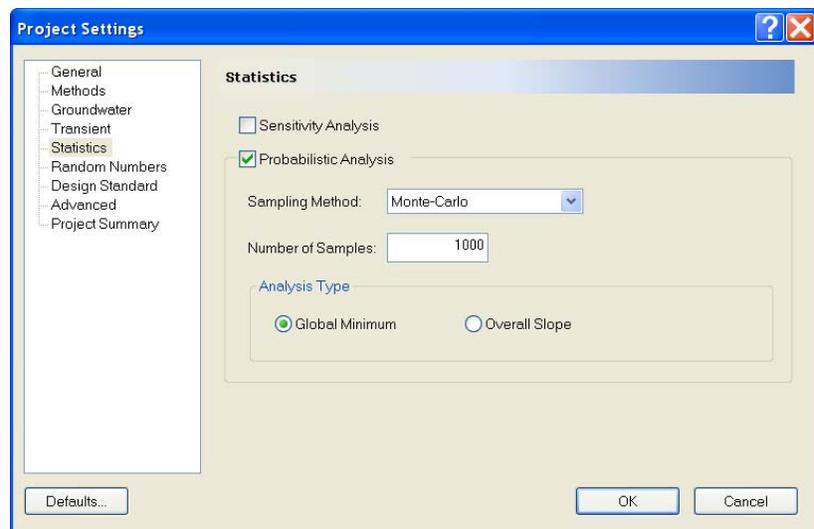
Seleccione Archivo > Carpetas Recientes > Carpeta de Tutoriales desde el menú principal del *Slide*, y abra el archivo **Tutorial 01 Inicio Rápido.slim** (“Tutorial 01 Quick Start.slim”).

Parámetros del Proyecto (“Project Settings”)

Para llevar a cabo un Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) con el *Slide*, la primera acción que debemos hacer es, seleccionar la opción Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) en la ventana de diálogo Parámetros del Proyecto (“Project Setting”).



Seleccione: Análisis → Parámetros del Proyecto (“Select: Analysis → Project Settings”)



En la ventana de diálogo Parámetros del Proyecto (“Project Settings”), seleccione la página Estadísticas (“Statistics”), y seleccione la casilla de selección de Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”). Seleccione OK.

Análisis de la Mínima Global (“Global Minimum Analysis”)

Note que estamos utilizando las opciones de Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) por defecto:

- Método de muestra= Monte Carlo
- Número de muestras= 1000
- Tipo de análisis = Mínima Global

Cuando el Tipo de Análisis (“Analysis Type”) = Mínima Global, esto significa que el Análisis Probabilístico se ha llevado a cabo (“Probabilistic Analysis”) sobre la superficie de falla Mínima Global, localizada mediante el análisis regular de estabilidad de taludes (determinista).

El factor de seguridad será re-computado N veces (en donde N = Número de Muestras) para la superficie de falla Mínima Global, utilizando una serie diferente de variables de entrada aleatoriamente generadas para cada análisis.

Note que ahora, está disponible el menú de Estadísticas (“Statistics”), el cual le permite definir casi todo parámetro de modelo de entrada, como una variable aleatoria.

Definiendo Variables Aleatorias (“Random Variables”)

Con el fin de llevar a cabo un Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”), debe definirse al menos, uno de sus parámetros de entrada de modelo, como una Variable Aleatoria (“Random Variable”). Las variables aleatorias son definidas, al utilizar las opciones en el menú de Estadísticas.

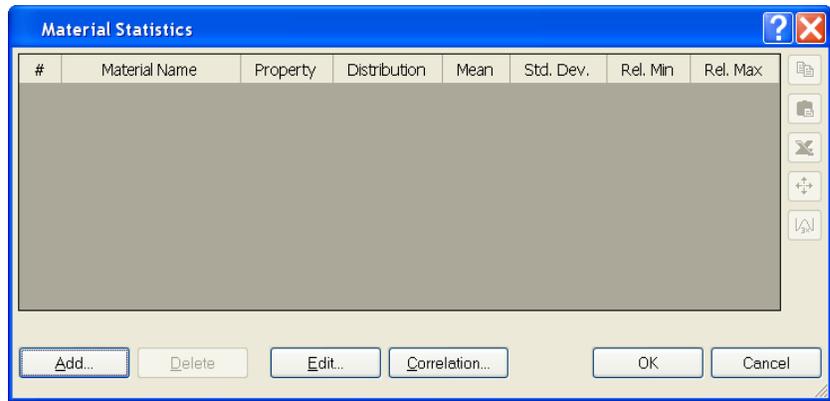
Para este tutorial, definiremos las siguientes propiedades de material como Variables Aleatorias (“Random Variables”):

- Cohesión
- Ángulo de fricción
- Peso unitario

Esto se puede realizar con facilidad con la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”).

Seleccione: Estadísticas → Materiales (“Select: Statistics → Materials”)

Usted verá la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”).

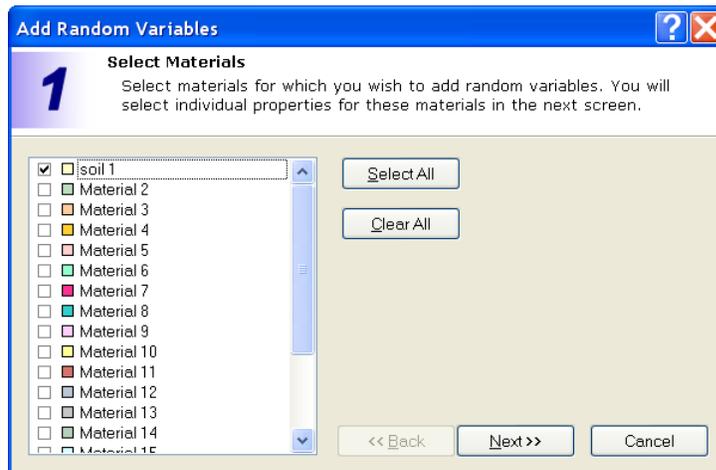


Primero, usted debe seleccionar las Variables Aleatorias (“Random Variables”) que usted desee utilizar. Esto puede realizarse con cualquiera de las opciones Añadir (“Add”) o Editar (“Edit”), en la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”). Utilicemos la opción Añadir (“Add”).

Seleccione el botón **Añadir** (“Add”) en el ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”).

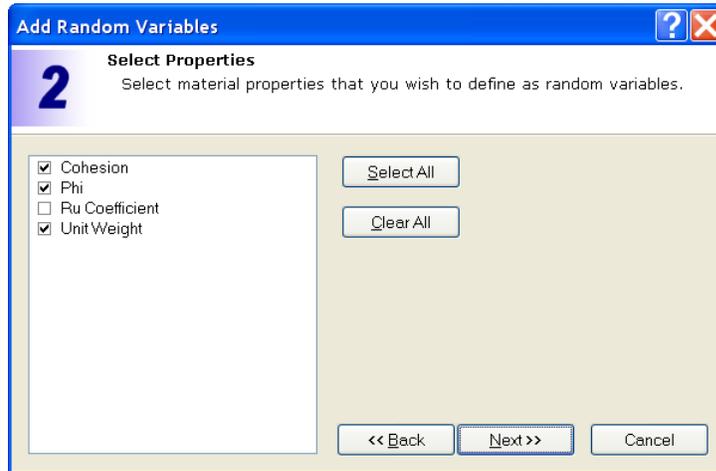
Cuando utilice la opción Añadir (“Add”), usted verá una serie de tres diálogos, en un formato “Wizard”, el cual le permite seleccionar de forma rápida las propiedades del material que usted desea definir como Variables Aleatorias (“Random Variables”).

Esta primera ventana de diálogo le permite seleccionar los materiales.



Seleccione la casilla de opciones para el material “suelo 1” (nuestro modelo de talud sólo utiliza este tipo de material). Seleccione el botón Siguiente (“Next”).

La segunda ventana de diálogo le permite seleccionar las propiedades del material que a usted le gustaría definir como Variables Aleatorias.

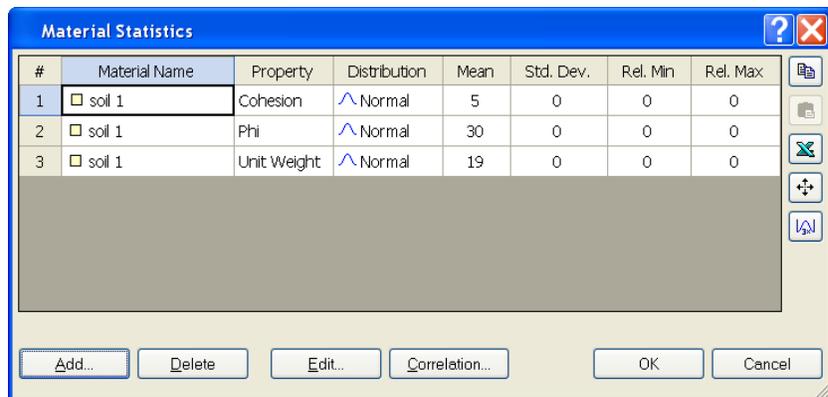


Seleccione las casillas de selección para Cohesión (“Cohesion”), Φ (“Phi”), Peso Unitario (“Unit Weight”). Seleccione el botón Siguiente (“Next”).

La ventana de diálogo final le permite seleccionar la Distribución Estadística (“Statistical Distribution”) para las Variables Aleatorias (“Random Variables”).

Utilizaremos la (Distribución Normal) por defecto, de modo que sólo seleccione el botón Finalizar (“Finish”).

Usted deberá volver a la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”), la cual debe aparecer como sigue:



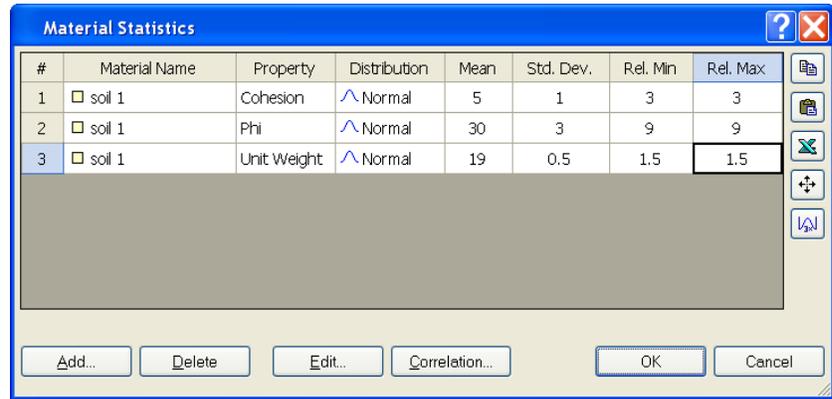
En la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”), las propiedades del material, las cuales usted seleccionó como Variables Aleatorias (“Random Variables”), ahora aparecen en la ventana de diálogo en un formato de hoja de cálculo. Esto le permite definir más fácilmente la distribución estadística para cada variable aleatoria.

Con el fin de completar el proceso de definición de Variables Aleatorias, nosotros debemos ingresar:

- Deviación Estándar (“Standard Deviation”) y
- Valores Mínimos y Máximos (“Minimum and Maximum”)

para cada variables, con el fin de definir la distribución estadística de cada variable aleatoria.

Ingrese los valores de Deviación Estándar (“Standard Deviation”), Relativa Mínima (“Relative Minimum”) y Relativa Máxima (“Relative Maximum”) para cada variable, tal como se muestra a continuación. Cuando usted haya finalizado, seleccione OK.



NOTA:

- Los valores Mínimos y Máximos están especificados como valores RELATIVOS (esto es, distancias desde el valor MEDIO), en lugar de como valores absolutos, ya que esto simplifica la introducción de datos.
- Para una distribución NORMAL, todas las muestras deben ser incluidas en las tres desviaciones estándar del valor medio. Por lo tanto, se recomienda que los valores Mínimos Relativos (“Relative Minimum”) y Máximos Relativos (“Relative Maximum”) sean iguales, al menos tres veces la desviación estándar, para asegurarse que se defina la distribución NORMAL (no truncada).
- Para mayor información sobre las Distribuciones Estadísticas, por favor revise la sección de Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) del sistema de Ayuda del Slide (“Slide Help system”).

Eso es todo lo que necesitamos hacer. Hemos definido 3 Variables Aleatorias (“Random Variables”) (cohesión, fricción y peso unitario) con distribuciones Normales.

Ahora, podemos ejecutar el Análisis Probabilístico.

Computar (“Compute”)

Primero, guardemos el archivo, con nombre de archivo: **pro1.slim**.

Seleccione: Archivo → Guardar Como (“Select: File → Save As”)

Utilice la ventana de diálogo Guardar Como (“Save As”) para guardar el archivo. Ahora, seleccione Computar (“Compute”).

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



NOTA:

- Cuando usted ejecuta el Análisis Probabilístico con el *Slide*, siempre se computa primero el análisis regular (determinista).
- Se ejecuta automáticamente el Análisis Probabilístico. Se indica el progreso del análisis en la ventana de diálogo Computar (“Compute”).

Interpretar (“Interpret”)

Para visualizar los resultados del análisis:



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

Esto iniciará el programa Interpretar (“Interpret”) del *Slide*. Usted deberá ver la siguiente figura.

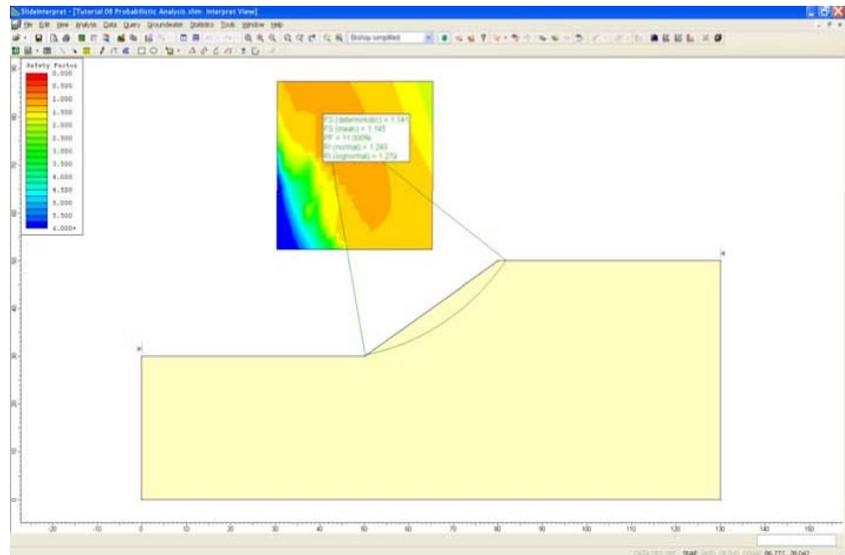


Figura 8-1: Resultados después del análisis probabilístico.

Los resultados principales del análisis probabilístico, son desplegados junto al centro de falla de la superficie de falla mínima

global determinística. Recuerde que cuando el Tipo de Análisis Probabilístico (Probabilistic Analysis)= Mínima Global (Global Minimum), en esta superficie, sólo se lleva a cabo el Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”).

Esto incluye lo siguiente:

- FS (medio) – el factor de seguridad medio
- PF – la probabilidad de falla
- RI – el Índice de Confiabilidad

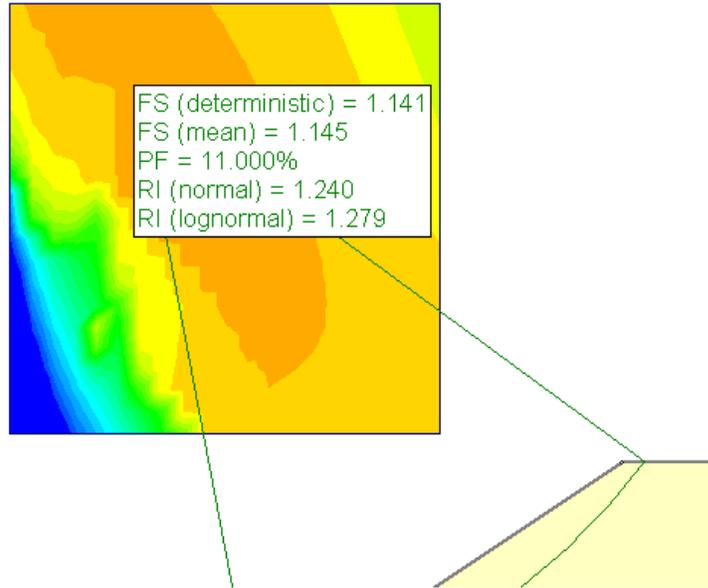


Figura 8-2: Resumen de los resultados después de realizado el análisis probabilístico.

Estos resultados son expuesto a continuación.

Factor de Seguridad Determinístico (“Deterministic Safety Factor”)

El Factor de Seguridad Determinístico (“Deterministic Safety Factor”), FS (determinístico), es un factor de seguridad calculado por la superficie Mínima Global (“Global Minimum”), a partir del análisis de estabilidad de taludes regular (no probabilístico).

Este es el mismo factor de seguridad que usted vería, si hubiera ejecutado un análisis regular (determinístico) y NO un Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”).

El Factor de Seguridad Determinístico (“Deterministic Safety Factor”) es el valor del factor de seguridad, cuando todos los parámetros de entrada son exactamente iguales a sus valores medios.

Factor de Seguridad Medio (“Mean Safety Factor”)

El Factor de Seguridad Medio (“Mean Safety Factor”), es el factor de seguridad medio (promedio), obtenido del Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”). Es simplemente el factor de seguridad promedio de todos los factores de seguridad calculados para la superficie de falla Mínima Global (“Global Minimum”).

En general, el Factor de Seguridad Medio (“Mean Safety Factor”) debe ser cercano al valor del factor de seguridad determinístico, FS (determinístico). Para un número suficientemente extenso de muestras, los dos valores deben ser casi iguales.

Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”)

La Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”) es simplemente igual al número de análisis con factor de seguridad menor de uno, dividido por el Número total de Muestras.

$$PF = \frac{\text{Núm.fallado}}{\text{Núm.muestras}} \times 100\% \quad \text{Ecuac. 1}$$

Para este ejemplo, PF=11%, lo que significa que 110 de 1000 muestras, produjeron un factor de seguridad menor de 1.

Índice de Confiabilidad (“Reliability Index”)

El Índice de Confiabilidad (“Reliability Index”) es otra medida comúnmente utilizada de estabilidad de taludes, después de un análisis probabilístico.

El Índice de Confiabilidad (“Reliability Index”) es una indicación del número de desviaciones estándar, la cual separa el Factor de Seguridad Medio (“Mean Safety Factor”) del factor de seguridad crítico (=1).

Se puede calcular el Índice de Confiabilidad (“Reliability Index”), asumiendo una distribución Normal o una distribución logarítmicamente normal de los resultados de factor de seguridad. La distribución real de mejor ajuste está enlistada en la Visualización de Información (“Info Viewer”), e indica que valor de RI es más apropiado para los datos.

IC (Normal)

Si se asume que los factores de seguridad están distribuidos Normalmente, entonces la Ecuación 2 es utilizada para calcular el Índice de Confiabilidad (“Reliability Index”).

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \text{ Ecuac. 2}$$

donde:

β = índice de confiabilidad

μ_{FS} = factor de seguridad medio

σ_{FS} = desviación estándar del factor de seguridad

Un Índice de Confiabilidad de al menos 3 es usualmente recomendado, como una mínima de seguridad de un diseño de talud seguro. Para este ejemplo, RI = 1.24, lo cual indica un nivel no satisfactorio de seguridad para el talud.

RI (Logarítmicamente normal)

Si se asume que los factores de seguridad están mejor ajustados por la distribución logarítmicamente normal, entonces la Ecuación 3 es utilizada para calcular el Índice de Confiabilidad.

$$\beta_{LN} = \frac{\mu}{\frac{\sqrt{1+V^2}}{\ln(1+V^2)}} \text{ Ecuac. 3}$$

donde μ = el factor de seguridad medio, y V = coeficiente de variación del factor de seguridad ($= \sigma / \mu$).

Para mayor información sobre el índice de Confiabilidad, ver el sistema de Ayuda del *Slide* (“*Slide Help system*”).

Gráficos de Histogramas (“Histogram Plots”)

Los gráficos de Histogramas le permiten visualizar:

- La distribución de muestras generadas para la(s) variable(s) aleatoria(s) de datos de entrada

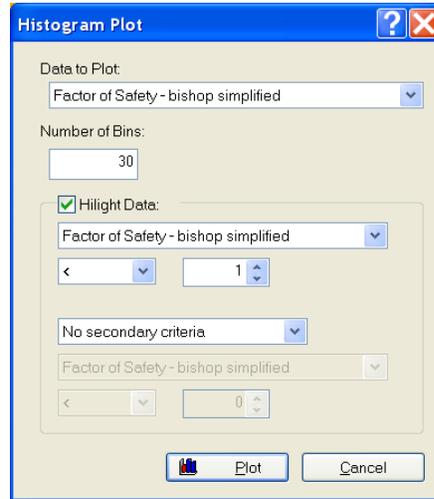
- La distribución de factores de seguridad calculados por el análisis probabilístico.

Para generar un gráfico de histograma, seleccione la opción Gráfico de Histograma desde la barra de herramientas o el menú de Estadísticas (“Statistics menu”).



Seleccione: Estadísticas → Gráfico de Histograma (“Select: Statistics → Histogram Plot”)

Usted verá la ventana de diálogo de Gráfico de Histograma (“Histogram Plot”).



Ahora, veamos un histograma de Factor de Seguridad (“Safety Factor”). Configure los Datos (“Data”) para Graficar (“Plot”) = Factor de Seguridad (“Safety Factor”) – Bishop Simplificado (“Bishop Simplified”). Seleccione la casilla de selección de Resaltar Datos (“Highlight Data”). Como el criterio de resaltar, seleccione “Factor de Seguridad (“Safety Factor)- Bishop Simplificado (“Bishop Simplified”) < 1”. Seleccione el botón Graficar y se generará un Histograma.

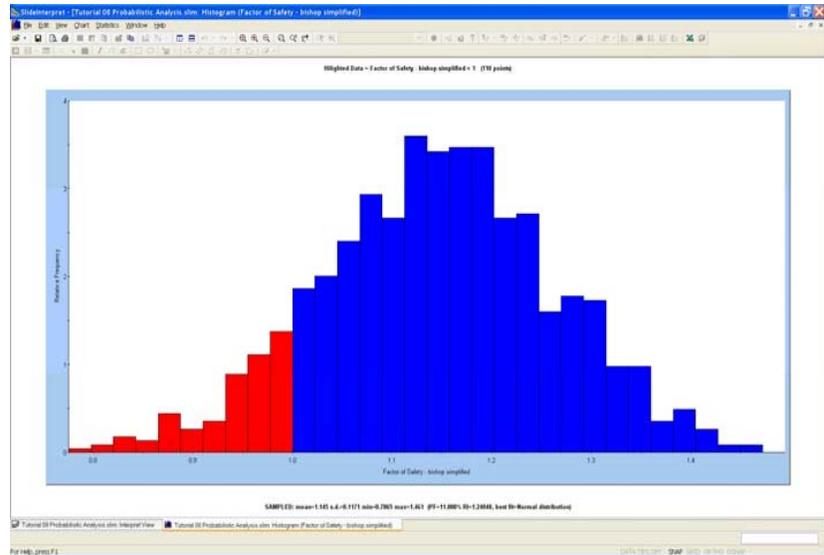


Figura 8-3: Histograma de Factor de Seguridad.

Como usted puede ver en el histograma, los datos resaltados (barras rojas) muestran el análisis, el cual resultó en un factor de seguridad menor de 1.

- Esto ilustra de forma gráfica la Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”), la cual es igual al área del histograma, que está resaltada ($FS < 1$), dividida por el área total del histograma.
- Las estadísticas del área resaltada están siempre enlistadas en la parte superior del gráfico. En este caso, se indica que 110/1000 puntos, tienen un factor de seguridad menor de 1. Esto equivale al 11%, que es la **PROBABILIDAD DE FALLA** (para el método de análisis Bishop).

En general, la opción Resaltar (“Highlight”) datos, le permite resaltar cualquier subconjunto de datos en un histograma (o gráfico de dispersión), y obtener las estadísticas del subconjunto de datos resaltado (seleccionado).

Usted puede mostrar la distribución de Mejor Ajuste para los datos de factor de seguridad, al hacer clic derecho sobre el gráfico, y al seleccionar la Distribución de Mejor Ajuste (“Best Fit Distribution”) desde el menú emergente. La Distribución de Mejor Ajuste (“Best Fit Distribution”) será desplegada. En este caso, el mejor ajuste es una Distribución Normal (“Normal Distribution”) tal como está enlistado en la parte inferior del gráfico.

Creemos un gráfico de la variable aleatoria de Cohesión. Haga clic derecho sobre el gráfico y seleccione Cambiar Datos de Gráfico (“Change Plot Data”). Configure los Datos (“Data”) para Graficar (“Plot”) = suelo 1: Cohesión (“Cohesion”). Seleccione Hecho (“Done”).

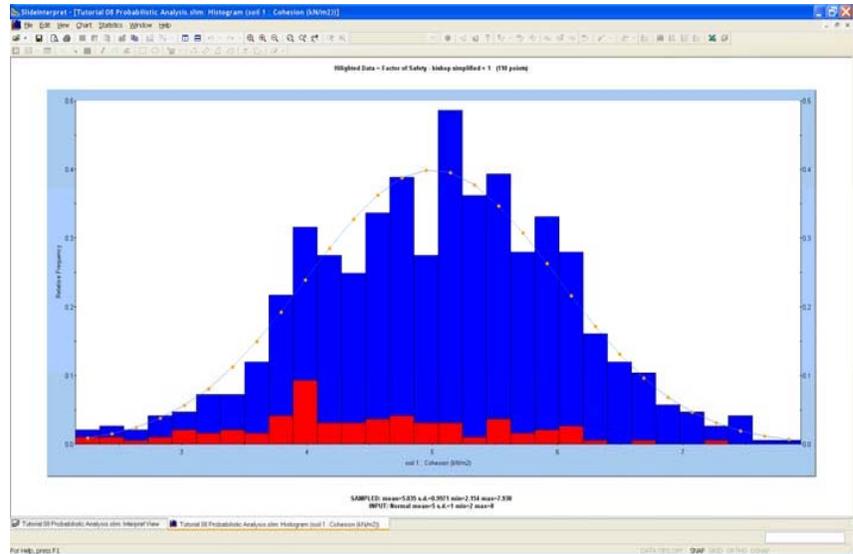


Figura 8-4: Gráfico de Histograma (“Histogram Plot”) de Cohesión (“Cohesion”).

Este gráfico exhibe las muestras aleatorias reales, las cuales fueron generadas por el muestreo Monte Carlo de la distribución estadística, la cual usted definió para la variable aleatoria de Cohesión. Note que los datos de Factor de Seguridad Bishop (“Bishop Safety Factor”) < 1 aún están resaltados en el gráfico.

Note la siguiente información en la parte inferior del gráfico:

- Las estadísticas de las MUESTRAS TOMADAS, son estadísticas de los datos originales generados por el muestreo de Monte Carlo de la distribución de entrada.
- Las estadísticas de ENTRADA, son los parámetros de la distribución de entrada, que usted definió para la variable aleatoria, en la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”).

En general, las estadísticas de MUESTRA TOMADA, y las estadísticas de ENTRADA no serán exactamente iguales. Sin embargo, al crecer el Número de Muestras, las estadísticas de MUESTRAS TOMADAS deben aproximarse a los valores de los parámetros de ENTRADA.

La distribución definida por los parámetros de ENTRADA es graficada en el Histograma. El despliegue de esta curva puede activarse o desactivarse, al hacer clic derecho sobre el gráfico, y cambiando la opción Distribución de Entrada.

Ahora, haga clic derecho sobre el gráfico nuevamente, y seleccione Cambiar Datos de Gráfico (“Change Plot Data”). Cambie los Datos (“Data”) para Graficar (“Plot”) a suelo 1: Fi (“Phi”). Seleccione Hecho (“Done”).

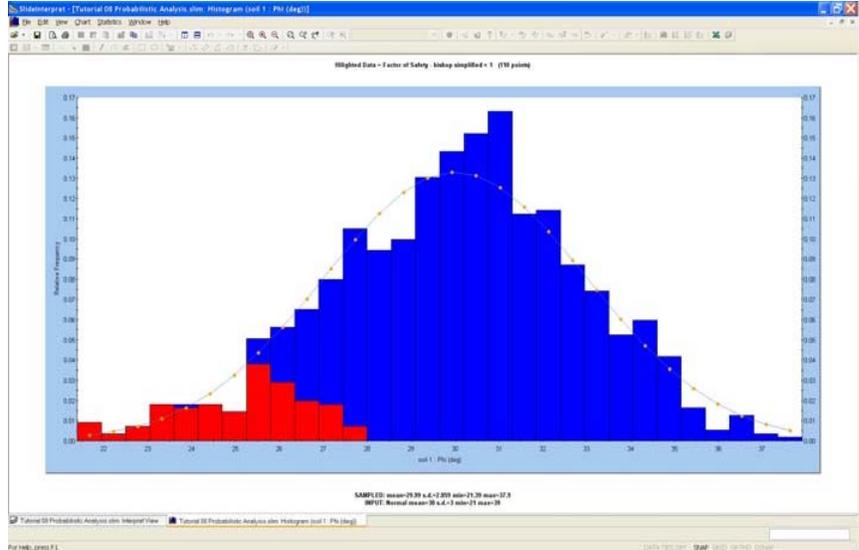


Figura 8-5: Gráfico de Histograma (“Histogram Plot”) de Ángulo de Fricción (“Friction Angle”).

Note que los datos con Factor de Seguridad Bishop (“Bishop Safety Factor”) < 1, resaltados en el gráfico. En relación con la variable aleatoria del Ángulo de Fricción, está claro que la falla corresponde a los ángulos de fricción más bajos, los cuales fueron generados por el muestreo aleatorio.

Gráficos acumulativos (“Cumulative Plots”)

Para generar un gráfico Acumulativo (“Cumulative plot”), seleccione la opción Gráfico Acumulativo (“Cumulative plot”) desde la barra de herramientas o el menú de Estadísticas (“Statistics menu”).



Seleccione: Estadísticas → Gráfico Acumulativo (“Select: Statistics → Cumulative Plot”)

Usted verá la ventana de diálogo Gráfico Acumulativo (“Cumulative Plot”).



Seleccione los Datos para Gráfico = Factor de Seguridad (“Factor of Safety”) – Bishop Simplificado (“Bishop Simplified”). Seleccione el botón Gráfico.

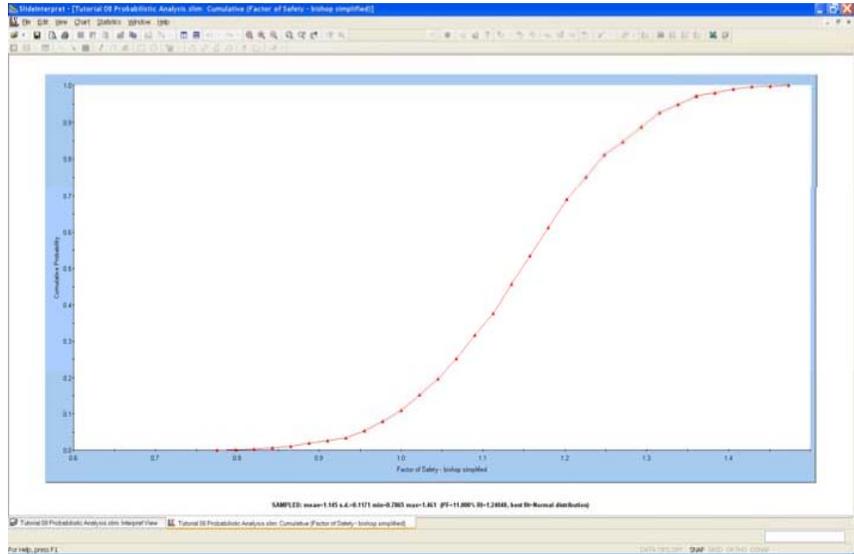


Figura 8-6: Gráfico Acumulativo (“Cumulative Plot”) de Factor de Seguridad (“Safety Factor”).

Un gráfico de distribución acumulativo representa la probabilidad acumulativa que el valor de una variable aleatoria será MENOR QUE O IGUAL AL valor dado.

Cuando visualizamos un Gráfico Acumulativo (“Cumulative Plot”) de Factor de Seguridad (“Safety Factor”), la Probabilidad Acumulativa (“Cumulative Probability”) en el Factor de Seguridad = 1, es igual a la PROBABILIDAD DE FALLA.

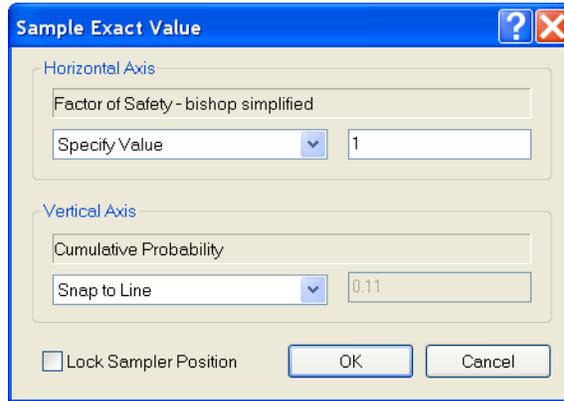
Verifiquemos esto como sigue.

Opción Muestrario (“Sampler Option”)

La Opción Muestrario (“Sampler Option”) en un Gráfico Acumulativo (“Cumulative Plot”), le permite determinar fácilmente las coordenadas en cualquier punto, a lo largo de la curva de distribución Acumulativa (“Cumulative”).

1. Haga clic derecho en el Gráfico Acumulativo (“Cumulative Plot”) y seleccione la opción Muestrario (“Sampler”).
2. Usted verá una línea vertical punteada en el gráfico. Esto es un “Muestrario”, y le permite obtener gráficamente las coordenadas en cualquier punto sobre la curva. Usted puede hacer esto como sigue.
3. Haga Clic y OPRIMA el botón IZQUIERDO del mouse sobre el gráfico. Ahora, arrastre el mouse a lo largo del gráfico. Usted verá que el Muestrario (“Sampler”) sigue el mouse, y despliega continuamente las coordenadas de los puntos sobre las curvas del gráfico Acumulativo (“Cumulative plot”).

- Asimismo, usted puede determinar los puntos exactos sobre la curva de la siguiente manera.
Haga clic derecho sobre el gráfico, y seleccione, el Valor Exacto de Muestra (“Sample Exact Value”). Usted verá la siguiente ventana de diálogo.



- Ingrese 1 como un valor para el factor de seguridad, y seleccione OK.
- Note que el Muestrario (línea punteada) está ubicado ahora exactamente en el Factor de Seguridad (“Safety Factor”) =1. Asimismo, note que la Probabilidad Acumulativa (“Cumulative Probability”) = 0.11. Esto significa que la Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”) (método de análisis Bishop) = 11%, que es el valor que notamos anteriormente en este tutorial, desplegado en el centro de falla de la superficie de falla Mínima Global (“Global Minimum”).

Gráficos de Dispersión (“Scatter Plots”)

Los Gráficos de Dispersión (“Scatter Plots”) le permiten graficar cualquiera de las dos variables aleatorias una contra otra, en el mismo gráfico. Esto le permite analizar las relaciones entre las variables.

Seleccione la opción Gráficos de Dispersión (“Scatter Plot”) desde la barra de herramientas o el menú de Estadísticas (“Statistics menu”).



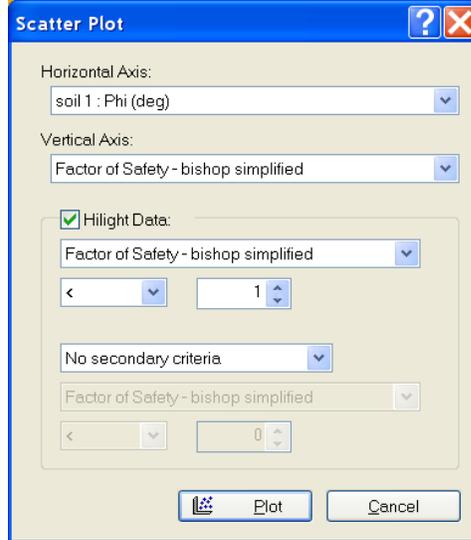
Seleccione: Estadísticas → Gráficos de Dispersión (“Select: Statistics → Scatter Plot”)

Usted verá la ventana de diálogo Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”). Ingrese los siguientes datos.

- Configure los Ejes Horizontales (“Horizontal Axis”) = suelo 1: F_i (“Phi”)
- Configure los Ejes Verticales (“Vertical Axis”) = Factor de

Seguridad – Bishop.

3. Seleccione Resaltar Datos (“Highlight Data”), y seleccione “Factor de Seguridad – Bishop Simplificado (“Bishop Simplified”) < 1”.
4. Seleccione Gráfico (“Plot”).



Usted debe ver el siguiente gráfico.

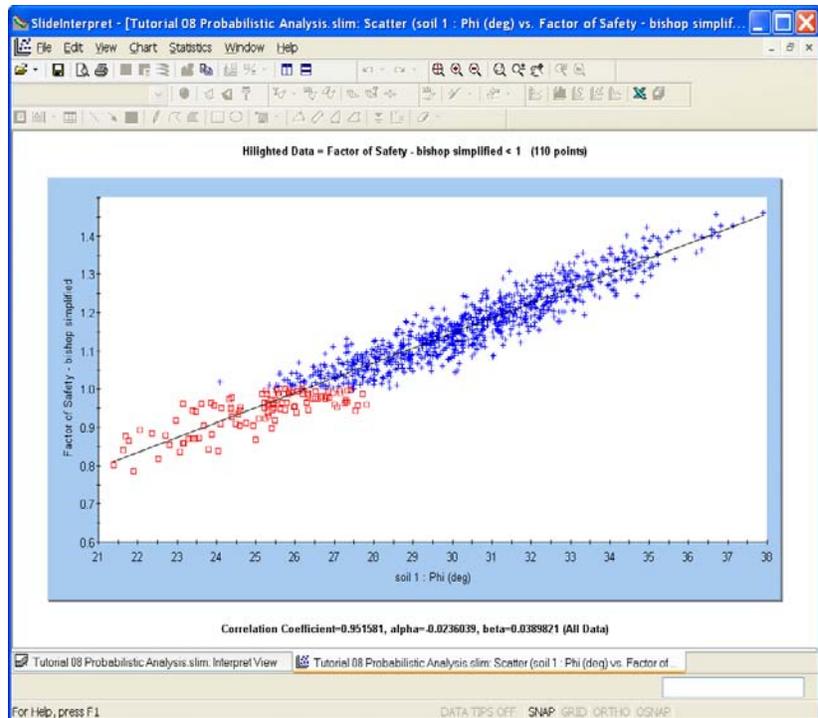


Figura 8-7: Gráficos de Dispersión (“Scatter Plot”) – Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) versus Factor de Seguridad (“Safety Factor”).

Existe una buena relación definida entre el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) y el Factor de Seguridad (“Safety Factor”). Note los parámetros enlistados en la parte inferior del gráfico.

- El Coeficiente de Correlación (“Correlation Coefficient”) indica el grado de correlación entre las dos variables graficadas. Un Coeficiente de Correlación (“Correlation Coefficient”) cercano a 1 (o -1) indica un alto grado de correlación. Un Coeficiente de Correlación (“Correlation Coefficient”) cercano a cero, indica poco o ninguna correlación.
- Los parámetros Alfa y Beta, son el talud y la intercepción y, respectivamente, de la curva de mejor ajuste (lineal) para los datos. Se puede ver esta línea en el gráfico. Puede activarse o desactivarse su despliegue, al hacer clic derecho sobre el gráfico, y al seleccionar la opción de Línea de Regresión (“Regression Line”).

También note los datos resaltados en el gráfico. Todos los puntos de datos con un Factor de Seguridad (“Safety Factor”) menor de 1, son desplegados en el Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) como un CUADRADO ROJO en lugar de una CRUZ AZUL.

Ahora, grafiquemos Φ (“Phi”) versus la Cohesión (“Cohesion”) en el Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”).

Haga clic derecho sobre el gráfico, y seleccione Cambiar Datos de Gráfico (“Change Plot Data”). En los Ejes Verticales (“Vertical Axis”), seleccione suelo 1: Cohesión (“Cohesion”). Seleccione Hecho (“Done”). El gráfico debe lucir como sigue:

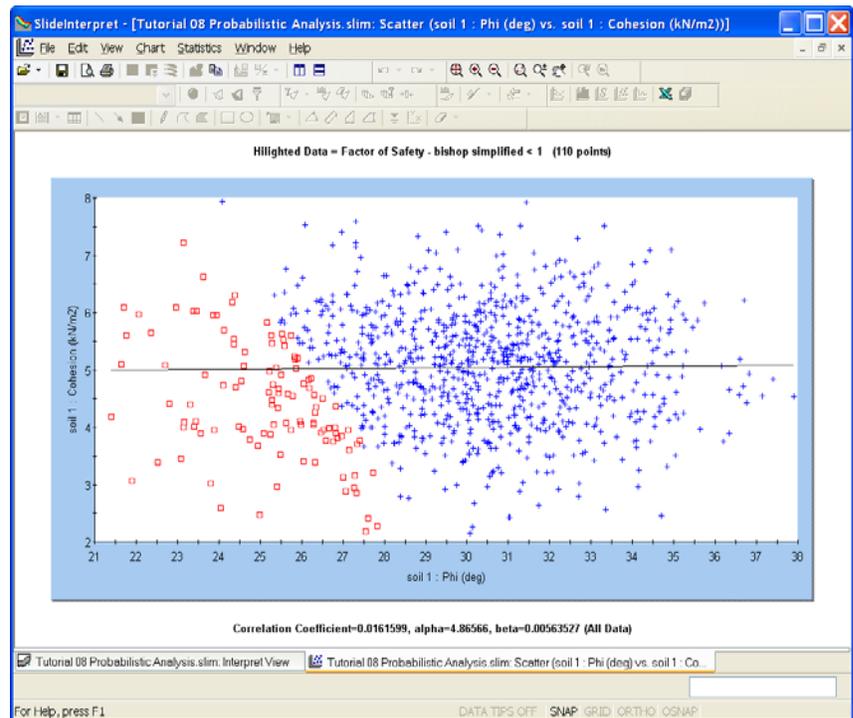


Figura 8-8: Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) – Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) versus Cohesión (“Cohesion”).

Este gráfico indica que no existe correlación entre los valores muestreados de Cohesión (“Cohesion”) y Ángulo de Fricción (“Friction Angle”). (El Coeficiente de Correlación (“Correlation Coefficient”) enunciado en la parte inferior del gráfico, es un pequeño número cercano a cero).

En realidad, la Cohesión (“Cohesion”) y Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) de los materiales Mohr-Coulomb están generalmente correlacionados, tal que los materiales con Cohesión (“Cohesion”) baja tienen a menudo altos Ángulos de Fricción (“Friction Angles”), y viceversa.

En el *Slide*, el usuario puede definir un coeficiente de correlación para la Cohesión (“Cohesion”) y el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”), a fin de que cuando se generen las muestras, la Cohesión (“Cohesion”) y Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) sean correlativos. Este tema desarrolla al final de este tutorial.

Gráficos de Convergencia (“Convergence Plots”)

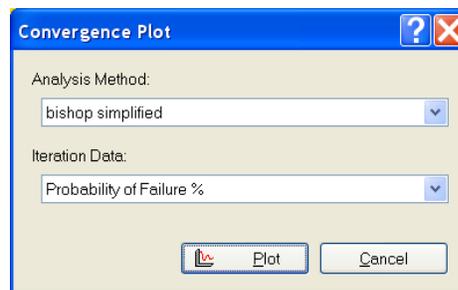
Un Gráfico de Convergencia (“Convergence Plot”) es útil para determinar si su Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) converge o no en una respuesta final, o si se requieren más muestras.

Seleccione la opción de Gráfico de Convergencia (“Convergence Plot”) desde la barra de herramientas o el menú de Estadísticas (“Statistics”).



Seleccione: Estadísticas → Gráfico de Convergencia (“Select: Statistics → Convergence Plot”)

Usted verá la ventana de diálogo de Gráfico de Convergencia (“Convergence Plot”). Seleccione Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”). Seleccione Gráfico.



Usted debe ver el siguiente gráfico.

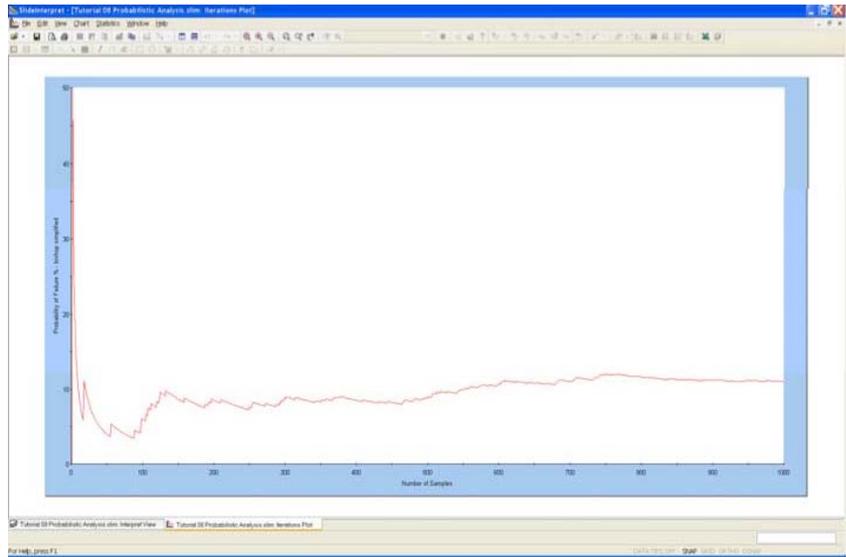


Figura 8-9: gráfico de convergencia – Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”).

Un gráfico de convergencia debería indicar que los resultados finales del Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”), converjan en valores finales estables (esto es, Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”), Factor de Seguridad Medio (“Mean Safety Factor”), etc.).

Si el gráfico de convergencia indica que usted no ha alcanzado un resultado final estable, entonces usted deberá incrementar el Número de Muestras, y volver a ejecutar el análisis.

Haga clic derecho sobre el gráfico, y seleccione la opción Valor Final (“Final Value”) desde el menú emergente. Una línea horizontal aparecerá en el gráfico, ésta representa el valor final (en este caso, Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”) = 11%), la cual fue calculada para el análisis.

Para este modelo, parece que la Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”) ha alcanzado un valor final constante. Para verificar esto, incremente el Número de Muestras (ej. 2000), y vuelva a ejecutar el análisis. Se deja esto como un ejercicio opcional.

Ejercicios Adicionales (“Additional Exercises”)

Se motiva al usuario a experimentar con las características del modelado de Análisis Probabilístico (“Probabilistic Analysis”) e interpretación de datos en el *Slide*.

Pruebe los siguientes ejercicios.

Coefficiente de Correlación (“Correlation Coefficient”) (C y Fi)

Al inicio de este tutorial, nosotros visualizamos una Cohesión (“Cohesion”) de Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) versus el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) (ver Figura 8-8)

Debido a que el muestreo aleatorio de estas dos variables fue llevado a cabo de forma totalmente independiente, no hubo correlación entre las dos variables.

En realidad, la Cohesión (“Cohesion”) y Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) de materiales Mohr-Coulomb están generalmente correlacionados, ya que los materiales con Cohesión (“Cohesion”) baja tienden a tener Ángulos de Fricción (“Friction Angles”) altos y viceversa.

En el *Slide*, el usuario puede definir de forma sencilla el coeficiente de correlación para la Cohesión (“Cohesion”) y el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”), para que cuando se generen las muestras, la Cohesión (“Cohesion”) y el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) serán correlativos.

Se puede demostrar esto como sigue:

1. En el programa Modelo (“Model”) del *Slide*, seleccione la opción Estadísticas del Material (“Material Statistics”) en el menú Estadísticas (“Statistics”).
2. En la ventana de diálogo de Estadísticas del Material (“Material Statistics”), seleccione la opción Correlación (“Correlation”). Esta desplegará una ventana de diálogo, la cual le permite definir un coeficiente de correlación entre la cohesión y el ángulo de fricción (esto es aplicable sólo para los materiales que utilicen el tipo de resistencia Mohr-Coulomb).
3. En la ventana de diálogo de correlación, seleccione la casilla de selección Aplicar (“Apply”) para “suelo 1”. Utilizaremos el coeficiente de correlación por defecto de -0.5. Seleccione OK en la ventana de diálogo Correlación (“Correlation”). Seleccione OK en la ventana de diálogo Estadísticas del Material (“Material Statistics”).
4. Vuelva a computar el análisis.
5. En el programa Interpretar (“Interpret”) del *Slide*, cree un Gráfico de Dispersión (“Scatter Plot”) de Cohesión (“Cohesion”) versus al Ángulo de Fricción (“Friction Angle”). Usted debería ver lo siguiente.

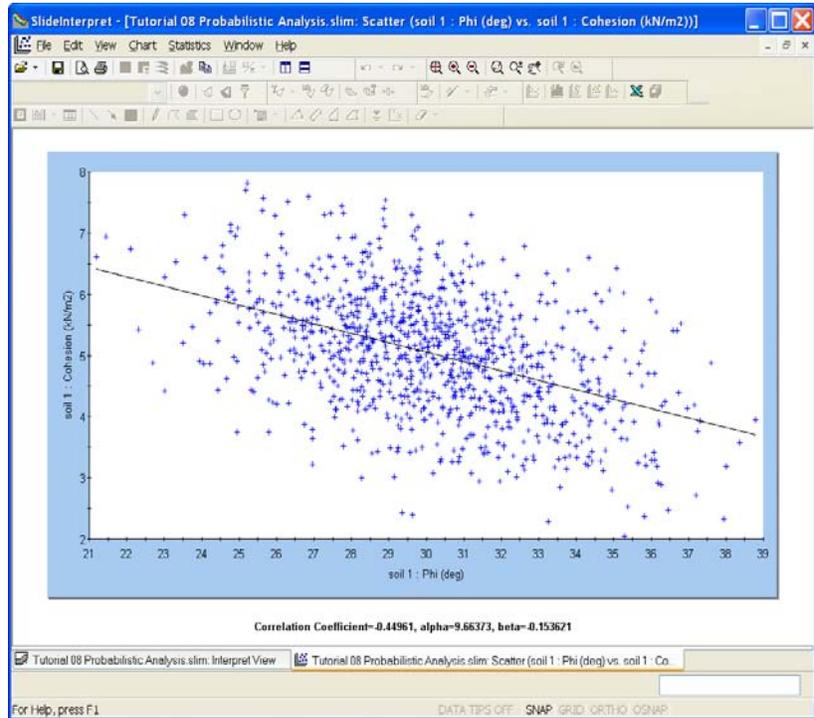


Figura 8-10: Cohesión (“Cohesion”) vs. Fi (“Phi”) (Correlación = - 0.5).

Como usted puede ver, la Cohesión (“Cohesion”) y Ángulo de Fricción (“Friction Angle”) ya no son independientes el uno del otro, pero están correlacionados en líneas generales. NOTA:

- La correlación de coeficiente real generada por el muestreo, está enunciada en la parte inferior del gráfico. No es textualmente igual a - 0.5, debido a que estamos utilizando el muestreo de Monte Carlo, y un número de muestras relativamente pequeño (1000).
- Un coeficiente de correlación NEGATIVO significa simplemente que cuando una variable aumenta, la otra posiblemente disminuye, y viceversa.

Ahora, pruebe lo siguiente:

1. Vuelva a ejecutar el análisis, utilizando los coeficientes de correlación de - 0.6, - 0.7, - 0.8, - 0.9, - 1.0. Visualice un gráfico de dispersión de Cohesión (“Cohesion”) versus un Ángulo de Fricción (“Friction Angle”), después de cada ejecución.
2. Usted verá que las dos variables se correlacionarán en aumento. Cuando el coeficiente de correlación = - 1.0, el Gráfico de Dispersión resultará en una línea recta.

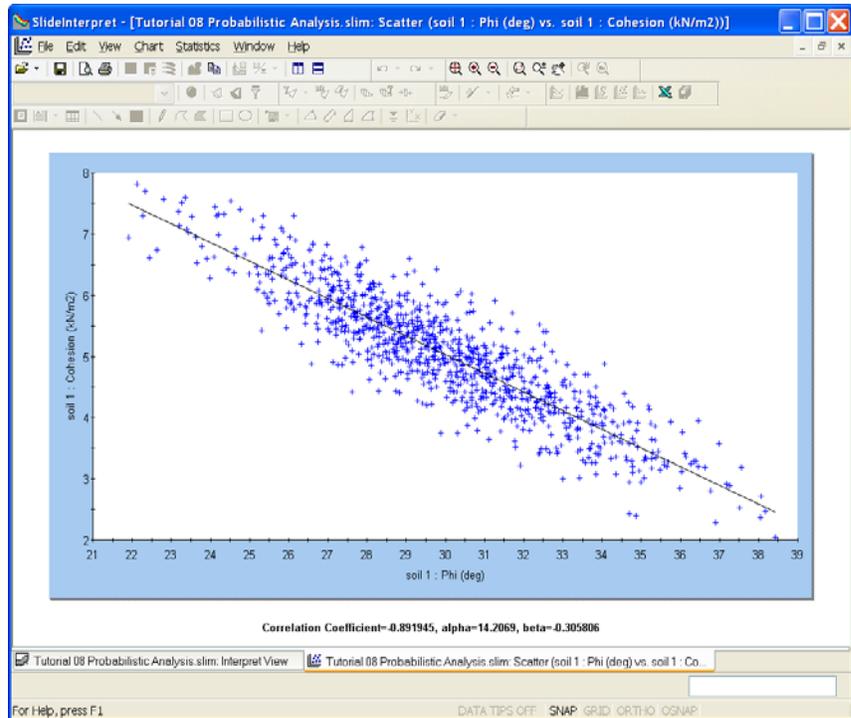


Figura 8-11: Cohesión (“Cohesion”) vs. Fi (“Phi”) (Correlación = - 0.9).

En general, se recomienda que un coeficiente de correlación sea definido entre la Cohesión (“Cohesion”) y el Ángulo de Fricción (“Friction Angle”), para un material Mohr-Coulomb. Esto generará valores de Cohesión (“Cohesion”) y Ángulos de Fricción (“Friction Angle”), los cuales tienen mayor probabilidad de que aparezcan en el área.

Finalmente, cabe señalar que la Probabilidad de Falla (“Probability of Failure”), para este modelo, disminuye significativamente, mientras que la correlación entre la cohesión y el ángulo de fricción aumenta (esto es, más cerca de -1).

Esto implica que el uso de un coeficiente de correlación, y la generación de más combinaciones realistas de Cohesión y Fi tienden a disminuir la probabilidad de falla calculada para este modelo.

Método de Muestreo (“Sampling Method”)

En este tutorial, utilizamos el método de Muestreo Aleatorio (“Random Sampling”), conocido como Muestreo Monte Carlo (“Monte Carlo Sampling”). Otro método de muestreo disponible en el *Slide*, es el método de muestreo Latin Hypercube.

Para un número de muestras dado, el muestreo Latin Hypercube resulta en un muestreo más eficaz y uniforme de funciones de densidad de probabilidad, las cuales usted definió para sus variables aleatorias comparado con el método Monte Carlo.

Para ilustrar esto, haga lo siguiente:

1. En el programa Modelo (“Model program”) del *Slide*, seleccione Parámetros del Proyecto > Estadísticas (“Project Settings > Statistics”), y configure el Método de Muestreo (“Sampling Method”) a Latin Hypercube.
2. Vuelva a computar el análisis.
3. Visualice los resultados en Interpretar (“Interpret”) y compare con los resultados previos (“Monte Carlo”). Particularmente, grafique histogramas de sus variables aleatorias de entrada (Cohesión (“Cohesion”), Φ (“Phi”), Peso Unitario (“Unit Wight”).
4. Note que las distribuciones de entrada de datos, que usted definió para sus variables aleatorias de entrada, son más fácilmente tomadas mediante el muestreo Latin Hypercube, en comparación con el muestreo Monte Carlo.

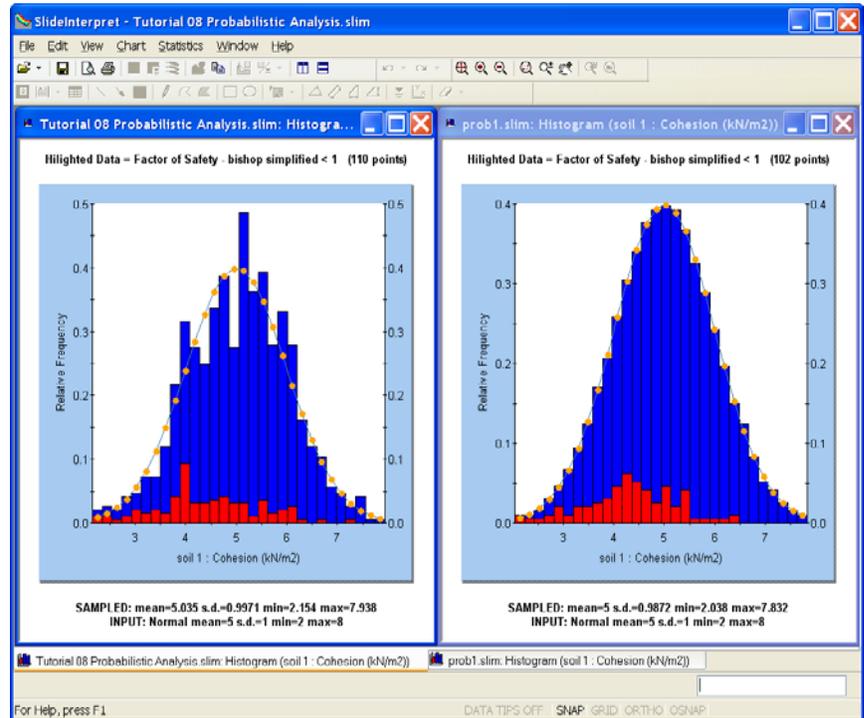


Figura 8-12: Comparación del muestreo Monto Carlo (izquierda) y el muestreo Latin Hypercube (derecha), Cohesión de variables aleatorias, 1000 muestras

Como usted puede ver en la Figura 8-12, para 1000 muestras, el muestreo Latin Hypercube es mucho más eficaz que el muestreo Monte Carlo.

Esto se debe a que el método Latin Hypercube está basado en un muestreo “estratificado”, con selección aleatoria dentro de cada estrato. Generalmente, un análisis que utilice 1000 muestras obtenidas por la técnica Latin Hypercube, producirá resultados comparables a los de un análisis de 5000 muestras, utilizando el método Monte Carlo.

En general, el método Latin Hypercube, le permite alcanzar resultados similares a los del método Monte Carlo, con un número de muestras significativamente más pequeño.

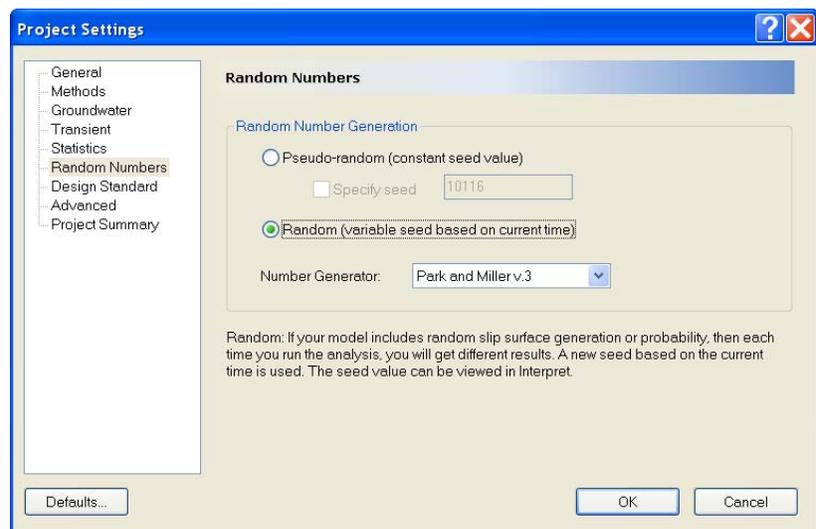
Generación de Número Aleatorio (“Random Number Generation”)

El muestreo de las distribuciones estadísticas de sus variables aleatorias de entrada de datos, es obtenido por la generación de números aleatorios. Usted se preguntará, ¿por qué los resultados en este tutorial son reproducibles, si están basados en números aleatorios?

La razón para esto, es que hemos utilizado la opción Pseudoaleatoria (Pseudo-Random), en los Parámetros del Proyecto. El análisis pseudoaleatorio significa que siempre se genera la misma secuencia de números aleatorios, ya que se utiliza el mismo valor “de inicio”. Esto le permite obtener resultados reproducibles para un Análisis Probabilístico (“Probabilistic Anlysis”).

Pruebe lo siguiente:

1. Seleccione los Parámetros del Proyecto > Números Aleatorios (“Project Settings > Random Numbers”), y seleccione la opción Aleatorio (en lugar de Pseudoaleatorio (“Pseudo -Random”)).



2. Vuelva a computar el análisis.

3. Usted notará que cada vez que usted vuelva a computar, los resultados del análisis probabilísticos serán diferentes. Esto se debe a que se utiliza un valor “de inicio” diferente cada vez. Esto proporcionará una secuencia diferente de números aleatorios, y por lo tanto, un diferente muestreo de sus variables aleatorias, cada vez que usted ejecute el análisis.