# Material Anisótropo Generalizado

Este tutorial describe como simular un material anisótropo en el *Slide*. En realidad, existen cuatro maneras distintas de lograrlo, pero este tutorial enfatizará el uso de la opción Anisótropo Generalizado ("Anisótropo Generalizado"), la cual le permite especificar diferentes **tipos de materiales** en diferentes direcciones. El tutorial también explicará cómo llevar a cabo un análisis probabilístico con este tipo de material.

Se puede encontrar el producto finalizado de este tutorial en el archivo de datos **Tutorial 20 Anisótropo Generalizado .slim** ("**Tutorial 20 Generalized Anisotropic.slim**"). Se puede acceder a todos los archivos de los tutoriales 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

- Material Anisótropo Generalizado
- · Búsqueda Avanzada no circular
- Análisis Probabilístico

#### <u>Geometría</u>



Inicie el programa Modelo ("Model") del Slide.

#### Parámetros del Proyecto ("Project Settings")



Abra la ventana de diálogo **Parámetros del Proyecto** ("**Project Settings**") desde el menú **Análisis** ("**Analyses**"). Configure las Unidades de Tensión ("Stress Units") a Métrico ("Metric"). Deje los otros valores por defecto:

Project Settings		2 ×
General Methods Groundwater Transient Statistics Random Numbers Design Standard Advanced Project Summary	General         Units of Measurement         Stress Units:       Metric         Time Units:       Days         Permeability Units:       meters/second         Failure Direction       Image: Comparison of the second of the sec	▼ ▼ ▼ Data Output ③ Standard ⑦ Maximum
Defaults		OK Cancel

Haga clic en Métodos ("Methods") en el lado izquierdo. Haga check en las casillas para GLE/Morgenstern- Price y Spencer.

Project Settings		? <b>X</b>
General Methods Groundwater Transient Statistics Random Numbers Design Standard Advanced Project Summary	Methods Methods Ø Bishop simplified Corps of Engineers #1 Corps of Engineers #2 Ø GLE/Morgenstern-Price Ø Janbu simplified Janbu corrected Lowe-Karafiath Ordinary/Fellenius Ø Spencer	Convergence Options Number of slices: 25 Tolerance: 0.005 Maximum iterations: 50 Interslice force function Half Sine Change
Defaults		OK Cancel

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

### Límites ("Boundaries")



Primero, añada un límite externo. Seleccione la opción **Añadir Límite Externo** ("**Add External Boundary**") en el menú **Límites** ("**Boundaries**") e ingrese las siguientes coordenadas:

0,0 130,0 130,50 80,50 33.5,30 0,30

c (para cerrar el límite)

Presione Ingresar ("Enter") para finalizar los puntos de entrada. El talud debe lucir así:



#### Propiedades del Material ("Material Properties")

Para el material del talud, utilizaremos la opción Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic"). Esto le permite especificar los diferentes tipos de materiales en diferentes direcciones. (Nota: Existen otros materiales anisótropos en el *Slide*, vea la siguiente sección para obtener más información).

Antes que configuremos el material Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic"), primero tenemos que configurar los materiales secundarios que constituirán el material generalizado. Para este ejemplo, asumiremos que el suelo tiene una estratificación subhorizontal débil. Constituiremos dos materiales: uno que representa la dirección paralela a la estratificación y otra que representa todas las otras orientaciones.



Seleccione **Definir Materiales** ("**Define Materials**") desde el menú **Propiedades** ("Properties"). Para el Material 1, configure el Nombre ("Name") a "Masa de Suelo" ("Soil Mass"). Deje el tipo de Resistencia ("Strength") como Mohr-Coulomb y configure la cohesión a 5 kN/m<sup>2</sup> y el ángulo de fricción a 30°.

Define Material Properties	? ×
<ul> <li>Soil Mass</li> <li>Material 2</li> <li>Material 3</li> <li>Material 4</li> <li>Material 5</li> <li>Material 6</li> <li>Material 8</li> <li>Material 9</li> <li>Material 10</li> <li>Material 11</li> <li>Material 12</li> <li>Material 13</li> <li>Material 14</li> <li>Material 15</li> <li>Material 16</li> <li>Material 17</li> </ul>	Soil Mass         Name:       Soil Mass         Colour.       ▼         Hatch:       ▼         Unit Weight:       20         KN/m3       Saturated U.W.       20         KN/m2       Phi:       30         Gegrees       30       degrees
— 🗖 Material 19 — 🗖 Material 20	Water Parameters Water Surface: None  Ru Value: 0
Copy To Statistics	Show only properties used in model OK Cancel

Ahora, haga clic en el enlace para Material 2. Cambie el Nombre ("Name") a "Estratificación". Configure la cohesión a 0 y el ángulo de fricción a 20°.

En este caso, ambos sub-materiales utilizan la resistencia Mohr-Coulomb, pero tienen diferentes valores de cohesión y ángulo de fricción. Se asignarán estos dos materiales al material Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic"), tal como se describe a continuación.

Define Material Properties	? <b>X</b>
<ul> <li>Soil Mass</li> <li>Bedding</li> <li>Material 3</li> <li>Material 4</li> <li>Material 5</li> <li>Material 6</li> <li>Material 8</li> <li>Material 9</li> <li>Material 10</li> <li>Material 11</li> <li>Material 12</li> <li>Material 13</li> <li>Material 14</li> <li>Material 15</li> <li>Material 16</li> <li>Material 17</li> </ul>	Bedding         Name:       Bedding         Colour:       Hatch:         Unit Weight:       20         kN/m3       Saturated UW.         Strength Type:       Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$ Strength Parameters       Image: Image: Cohesion:         0       kN/m2         Phi:       20         degrees
— 🗖 Material 19 — 🗖 Material 20	Water Parameters Water Surface: None  Ru Value: 0
Copy To Statistics	Show only properties used in model

Haga clic en el enlace para Material 3. Cambie el Tipo de Resistencia ("Strength Type") a Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic").

Define Material Properties	? ×
<ul> <li>Soil Mass</li> <li>Bedding</li> <li>Material 3</li> <li>Material 4</li> <li>Material 5</li> <li>Material 6</li> <li>Material 7</li> <li>Material 8</li> <li>Material 10</li> <li>Material 11</li> <li>Material 12</li> <li>Material 13</li> <li>Material 14</li> <li>Material 15</li> <li>Material 16</li> <li>Material 17</li> <li>Material 18</li> <li>Material 19</li> <li>Material 20</li> </ul>	Material 3         Name:       Material 3         Colour:       Hatch:         Unit Weight:       20         KN/m3       Saturated U.W.       20         Strength Type:       Generalized Anisotropic         Strength Parameters       Stength Parameters         Generalized Function:       *         New       Edit       Delete         Water Parameters       Ru Value:       0
Сору То	Show only properties used in model OK Cancel

Mediante los Parámetros de Resistencia ("Strength Parameters"), haga clic en el botón Nuevo ("New"). Ahora, usted verá una ventana de diálogo, en la cual usted puede especificar los diferentes materiales sobre los diferentes rangos angulares. Deseamos que el material de Estratificación ("Bedding") esté activo dentro de 20° del plano horizontal y que la Masa de Suelo ("Soil Mass") esté activa en todas las otras direcciones. En la ventana de diálogo se miden los ángulos desde el plano horizontal; por ende, el 90° representa el plano vertical. Ingrese -10 en la columna Ángulo Hasta ("Angle To"). Deje el Material como Masa de Suelo ("Soil Mass"). En la próxima fila, ingrese 10 en la columna Ángulo Hasta ("Angle To") y cambie el Material a Estratificación ("Bedding"). Finalmente, en la siguiente columna, configure el Ángulo Hasta ("Angle To")= 90 y deje el Material como Masa de Suelo ("Soil Mass"). Haga clic en algún lado de la fila y la ventana de diálogo debe lucir así:

	Define General	ized Anisotro	opic Strength Function		3 ×
Eur	ction name: U	ser Defined 1		✓ Legend ✓ Chart Labels	✓ Mirror Slices
Fur (la:	ction must be de stangle must be !	fined for -90 de 90, but do not e	egrees to +90 degrees enter -90 for the first angle )		
L	_ & ≞ ≣ ⊒⊷	‱ ⊒			
	Angle From	Angle To	Material		
1	-90	-10	Soil Mass		
2	-10	10	Bedding		
3	10	90	Soil Mass		
4			Soil Mass		
5			Soil Mass		
6			Soil Mass		
7			Soil Mass		
8			Soil Mass		
9			Soil Mass		
10			Soil Mass		90 to 10 degrees:
			OK Cancel		10 to -10 degrees: -10 to -90 degrees:
_					

Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo. Ahora, se asignó el Material 3 a Función Generalizada ("Generalized Funcion") "Usuario Definido 1" ("User Defined 1").

Define Material Properties	? <b>X</b>
<ul> <li>Soil Mass</li> <li>Bedding</li> <li>Material 3</li> <li>Material 4</li> <li>Material 5</li> <li>Material 6</li> <li>Material 7</li> <li>Material 8</li> <li>Material 9</li> <li>Material 10</li> <li>Material 11</li> <li>Material 12</li> <li>Material 12</li> <li>Material 14</li> <li>Material 14</li> <li>Material 16</li> <li>Material 17</li> <li>Material 17</li> <li>Material 18</li> </ul>	Material 3 Name: Material 3 Colour:  Hatch: Hatch:  Unit Weight: 20 kN/m3 Strength Type: Generalized Anisotropic Strength Parameters Generalized Function: User Defined 1  New Edit Delete
Material 19     Material 20	Water Parameters Water Surface: None  Ru Value: 0
Copy To Statistics	Show only properties used in model OK Cancel

Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo Definir Propiedades del Material ("Define Material Properties").

## Modelos de Material Anisótropo ("Anisotropic Material Models") en el <u>Slide</u>

Existen en realidad **cuatro** diferentes modelos de resistencia de material anisótropo disponibles en el *Slide*. Estos son:

- Resistencia Anisótropa ("Anisotropic Strength")
- Función Anisótropa ("Anisotropic Function")
- Línea Anisótropa ("Anisotropic Linear")
- · Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic")

Para este tutorial, usted puede crear el mismo modelo, al utilizar el tipo de resistencia **Función Anisótropa** ("**Anisotropic Function**"), la cual le permite delimitar los rangos angulares discretos con las propiedades Mohr-Coulomb. Sin embargo, el tipo de resistencia **Anisótropa Generalizada** ("**Generalized Anisotropic**") ofrece las siguientes ventajas:

- Cualquier tipo de material puede asignarse a cada rango angular. Todos no tienen que tener un criterio de fallo Mohr-Coulomb. Usted puede combinar y hacer coincidir cualquiera de los tipos de materiales que desee (ej. Hoek-Brown y Mohr-Coulomb).
- El tipo de resistencia Anisótropa Generalizada ("Generalized Anisotropic") le permite utilizar un análisis probabilístico, mientras que el tipo de resistencia de Función Anisótropa ("Anisotropic Function") no. Esto se analizará más a fondo posteriormente en el tutorial.

Vea el sistema de Ayuda del *Slide* ("*Slide* Help system") para obtener más detalles sobre cuáles de los diferentes modelos de resistencia anisótropa están disponibles.

#### Asignar Materiales ("Assign Materials")

Por defecto, se asigna al talud el Material 1 (Masa de Suelo ("Soil Mass")). Necesitamos configurar el material del talud al material Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic") que usted definió anteriormente ("Material 3"). Haga clic derecho en el modelo y seleccione Asignar Material  $\rightarrow$  Material 3 ("Assign Material  $\rightarrow$  Material 3"). El modelo lucirá así:



#### Superficies de Falla ("Slip Surfaces")

Seleccione Superficies  $\rightarrow$  Opciones de Superficies ("Surfaces  $\rightarrow$  Surface Options"). Mediante el Método de Búsqueda ("Search Method"), elija la Búsqueda Avanzada ("Auto Refine Search").

Surface Options	8 ×
Surface Type Circular Non-Circular	Search <u>M</u> ethod Auto Refine Search 🔹
Auto <u>R</u> efine Search Options	
Divisions along slope:	10
Circles per division:	10
Number of Iterations:	10
Divisions to use in next iteration	: 50 %
Number of Surfaces Computed Number of Surfaces Interpreted	: 4500 I: 45
Composite Surfaces	
Surface <u>F</u> ilter	
Min. Elevation	m 🥅 Min. Depth 🛛 🛛 m
Defaults	OK Cancel

Haga clic en OK.

#### 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 llevar a cabo el análisis y elija Interpretar ("Interpret") desde el menú Análisis ("Analysis") para visualizar los resultados.

#### Interpretar ("Interpret")

El programa Interpretar ("Interpret") muestra los resultados del análisis Simplificado Bishop ("Bishop Simplified") por defecto. Usted puede ver que el factor de seguridad es 1.478.



El método de equilibrio límite calcula la estabilidad de cada posible superficie de falla, al dividir el área circular dentro de los cortes y al comparar la tensión al corte y resistencia en la base de cada corte. Con el modelo del material Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic"), el ángulo de base de cada corte determina que material es utilizado para calcular la resistencia.



Diríjase a Búsqueda  $\rightarrow$  Búsqueda de Datos de Corte ("Query  $\rightarrow$  Query Slice Data"). Haga clic en un corte que se encuentre cerca de la mitad del talud. En la ventana de diálogo Datos de Corte ("Slice Data"), desplace el cursor hacia abajo, para que pueda ver el Material de Base ("Base Material"). Para este corte, este debe ser 1 (Masa de Suelo ("Soil Mass").



Ahora, haga clic en un corte cerca del pie del talud.

En esta región, la base de cada corte es casi horizontal, por lo tanto el material base es el Material 2 (Estratificación ("Bedding")).

Esto demuestra la dependencia del modelo de resistencia aplicada a la orientación de la base del talud, para el modelo Anisótropo Generalizado ("Generalized Anisotropic").



Si usted desplaza el cursor hacia atrás hasta la ventana de diálogo Datos de Corte ("Slice Data"), usted verá que la base de fricción y la cohesión reflejan los valores ingresados para el Material 2 (c = 0 and  $\phi = 20^{\circ}$ ).

#### Superficie de Falla no circular ("Non-circular Failure Surface")

Debido al plano de estratificación débil, es probable que las partes de la superficie de falla tiendan a seguir la estratificación en una dirección sub horizontal. Probablemente, estamos sobrevalorando el factor de seguridad, al forzar la superficie de falla circular. Podemos probar esto fácilmente, al especificar una superficie de falla no circular y al observar los resultados.



Diríjase al programa Modelo ("Model"). Seleccione **Superficies**  $\rightarrow$  **Opciones de Superficie** ("**Surfaces**  $\rightarrow$  **Surface Options**"). Mediante Tipo de Superficie ("Surface Type"), elija la No Circular ("Non-Circular"). Mediante el Método de Búsqueda ("Search Method"), elija la Búsqueda Avanzada ("Auto Refine Search"). Este método buscará de forma automática la superficie crítica no circular. Vea el sistema de Ayuda ("Help system") para obtener más información.

Surface Options	<u> २</u>		
Surface Type Circular Non-Circular	Search <u>M</u> ethod Auto Refine Search 🔹		
Noncircular Auto Refine Search Op	ptions		
Divisions along slope:	10		
Circles per division:	10		
Number of Iterations:	10		
Divisions to use in next iteration:	50 %		
Number of vertices along surfac	ce: 12		
Number of Surfaces Computed: 4500 Number of Surfaces Interpreted: 45			
✓ Optimize Surfaces	ettings		
Surface <u>F</u> ilter			
Min. Elevation 0 f	t Min. Depth 0 ft		
Defaults	OK Cancel		

Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo.

## Computar ("Compute")





Guarde este modelo, utilice la opción Guardar Como ("Save As") en el menú de Archivo ("File"). Elija Computar ("Compute") desde el menú Análisis ("Analysis") para llevar a cabo el análisis. Este cálculo será más largo que el anterior, ya que el programa busca más posibles superficies.

Elija **Interpretar** ("**Interpret**") desde el menú **Análisis** ("**Analysis**") para visualizar los resultados.

#### Interpretar ("Interpret")

Sin superficies circulares, se muestran todos los centros de rotación por defecto. Usted necesita acercarse al talud para visualizar la superficie de falla crítica.

Usted puede visualizar que el factor de seguridad es de 1.268. Notablemente menor que el valor 1.478 calculado suponiendo una superficie circular. Asimismo, también es interesante observar la forma de la superficie crítica, una sección de falla sub horizontal conectada a la superficie por una pendiente pronunciada. Si usted busca los cortes que constituyen la sección sub horizontal, usted verá que el material base para cada corte es el Material 2 (Estratificación). Esto muestra la importancia de utilizar una superficie de falla no circular en los modelos anisótropos, ya que la superficie de falla "busca" la orientación de la estratificación débil para producir un factor de seguridad menor.



## Análisis Probabilístico ("Probabilistic Analysis")





Regrese al programa Modelo ("Model") del *Slide*. Ahora, asumiremos que el ángulo de fricción de la orientación de estratificación no es conocido y determinaremos la probabilidad de falla para una distribución determinada de ángulos de fricción para la estratificación.

Abra la ventana de diálogo **Parámetros del Proyecto** ("**Project Settings**") desde el menú **Análisis** ("**Analysis**"). En la parte izquierda, haga clic en **Estadísticas** ("**Statistics**"). Coloque check en la casilla para Análisis Probabilístico ("Probabilistic Analysis"). Deje el tipo de análisis como Mínimo Global ("Global Minimum"). Este encontrará una superficie crítica determinísticamente y luego calculará el factor de seguridad, al utilizar esta superficie con las distintas propiedades del material. Para volver a computarizar la superficie de falla crítica para cada aleatorización de propiedades del material, usted podrá elegir la Pendiente Total ("Overall Slope"). Esto se dejará como un ejercicio adicional, puesto que esto toma mucho tiempo para computarizar.

Project Settings	? ×
Project Settings General - Methods - Groundwater - Transient - Statistics - Random Numbers - Design Standard - Advanced - Project Summary	Statistics  Sensitivity Analysis  Probabilistic Analysis  Sampling Method: Monte-Carlo  Number of Samples: 1000  Analysis Type  Global Minimum Overall Slope
Defaults	OK Cancel

Haga clic en Ok para cerrar la ventana de diálogo.

2

Ahora, vamos a definir la distribución estadística de la resistencia de la capa de estratificación. Diríjase a **Estadísticas**  $\rightarrow$  **Materiales** ("**Statistics**  $\rightarrow$  **Materials**"). En la ventana de diálogo Estadísticas ("Statistics"), haga clic en el botón Añadir ("Add"). Sólo variaremos la resistencia de Estratificación ("Bedding"); por lo tanto haga clic en Estratificación ("Bedding").

Add Random Variables		? ×
Select Materials		
Select materials for select individual prop	vhich	you wish to add random variables. You will for these materials in the next screen.
	Â.	Select All
Metorial 3		
		<u>C</u> lear All
	Ξ	
Material 7		
□ □ Material 10		
Material 11		
🗌 🗆 Material 12	-	// Back Novt >> Cancel

Haga clic en Siguiente ("Next"). La cohesión de la estratificación es 0, por lo que sólo cambiaremos el ángulo de fricción. Coloque check en la casilla para Fi ("Phi").

Slide v.6.0

Add Random Variables	? ×		
2 Select Properties Select material properties	s that you wish to define as random variables.		
Cohesion       Select All         Phi       Clear All         Unit Weight       Clear All			

Haga clic en Siguiente ("Next"). Para la Distribución Estadística ("Statistical Distribution"), elija Normal.

Add Rand	dom Variables					
3	3 Select Distribution You can assign the initial statistical distribution for ALL the variables that will be added.					
	Statistical Distribution : 🔨 Normal 👻					
	< <u>     Kack</u> Finish     Cancel					

Haga clic en Finalizar ("Finish"). Ahora necesita ingresar la Media ("Mean") y Deviación Estándar ("Standard Deviation") para la distribución. El Medio ("Mean") está automáticamente configurado al valor determinístico del análisis previo (20°); de modo que sólo necesitamos configurar la deviación estándar. Ingrese 5. Ahora, usted puede configurar automáticamente el máximo y mínimo a 3 deviaciones estándar, al hacer clic en el botón inferior en la parte derecha<sup>[M]</sup>. La ventana de diálogo debe lucir así:

_	М	Material Statistics								
	#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max		
l	1	Bedding	Phi	∧ Normal	20	5	15	15		
l										
									<b>+</b>	
									الډکا	
l										
						Ъ				
	Add Delete Edit Correlation OK Cancel								el	

Haga clic en OK para cerrar la ventana de diálogo.

### Computar ("Compute")

Guarde el modelo, utilice la opción **Guardar** ("**Save**") en el menú **Archivo** ("**File**").



Elija **Computar** ("**Compute**") desde el menú Análisis ("Analysis") para llevar a cabo el análisis y elija **Interpretar** ("**Intrepret**") desde el menú **Análisis** ("**Analysis**") para visualizar los resultados.

#### Interpretar ("Interpret")

Ahora, usted observará los centros de rotación determinísticos y la superficie de falla mínima global, junto con algunos datos estadísticos (usted necesitará acercar la imagen).



Usted puede observar el factor de seguridad medio (1.276) se encuentra cerca del factor de seguridad determinístico (1.268) y que la probabilidad de falla es de (PF) 7%.



Usted puede observar la distribución de factores de seguridad, al dirigirse a **Estadísticas**  $\rightarrow$ **Gráfico de Histograma** ("**Statistics**  $\rightarrow$ **Histogram Plot**"). Configure los Datos ("Datos") para Graficar (Plot) = Factor de Seguridad ("Factor of Safety")- Bishop Simplificado ("Bishop Simplified"). Seleccione la casilla de selección Resaltar Datos ("Highlight Data"). En cuanto al criterio de destaque, seleccione "Factor de Seguridad (Factor of Safety)- Bishop Simplificado ("Bishop Simplified")" y configure el criterio a < 1.

Histogram Plot	? ×						
Data to Plot:							
Factor of Safety - bishop simplified							
Number of Bins:							
30							
Hilight Data:							
Factor of Safety - bishop simplified	•						
< • 1 <u>*</u>							
No secondary criteria 🔹							
Factor of Safety - spencer	<b>*</b>						
M. Plot	<u>C</u> ancel						





SAMPLED: mean=1.276 s.d.=0.1923 min=0.7131 max=1.866 (PF=7.000% RI=1.43538, best fit=Normal distribution)

Usted puede observar una distribución normal esencialmente de factores de seguridad con un 7% aproximadamente del área mostrada en rojo (factor de seguridad menor de 1). Usted podrá obtener un gráfico más preciso, al utilizar más muestras en el análisis Monte-Carlo (ej. 10,000 en lugar de 1,000) o al elegir el método de muestra Latin-Hypercube. Vea el sistema de ayuda para obtener más detalles. Esto concluye este tutorial.