

RocLab

Análisis de la resistencia del macizo rocoso
mediante el criterio de rotura de Hoek-Brown

Guía del Usuario

© 2004 Rocscience Inc.

Versión en Español basada en una traducción realizada por el
Profesor José Chacón Montero
Departamento de Ingeniería Civil
ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Granada, España

Tabla de Contenidos

Prólogo	2
Bienvenidos a RocLab!	3
Introducción	4
Documentación	5
Cómo se debe utilizar RocLab?	6
Determinar Parámetros de Resistencia	6
Proyectar Envolventes de Rotura	6
Estimación de Parámetros de Entrada	6
Resultados de Ensayos Triaxiales	6
Parámetros Equivalentes de Mohr-Coulomb	7
Muestreador de Tensiones	7
Muestreador de Parámetros de Mohr-Coulomb Instantáneos	7
Otros Parámetros del Macizo Rocoso	7
Unidades	7
Exportar Datos e Imágenes	8
Opciones de Representación	8
Visita rápida a RocLab	9
Introducción de Datos	9
Estimación de los Parámetros de Entrada	10
Proyección de Envolventes de Rotura	12
Estimación de Parámetros de Hoek-Brown	14
Equivalencia con el Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb	14
Otros Parámetros del Macizo Rocoso	15
Datos de Laboratorio del Ensayo Triaxial	16
Ejemplo 1 – Túnel, sin Perturbar (D=0)	17
Ejemplo 2 – Talud, Perturbado (D=1)	19
Muestreador de Tensiones en Puntos de la Envoltura	21
Muestreador de Parámetros de Mohr-Coulomb Instantáneos	22
Exportación de Datos e Imágenes	23
Opciones para la Representación en Pantalla	24
Referencias	27

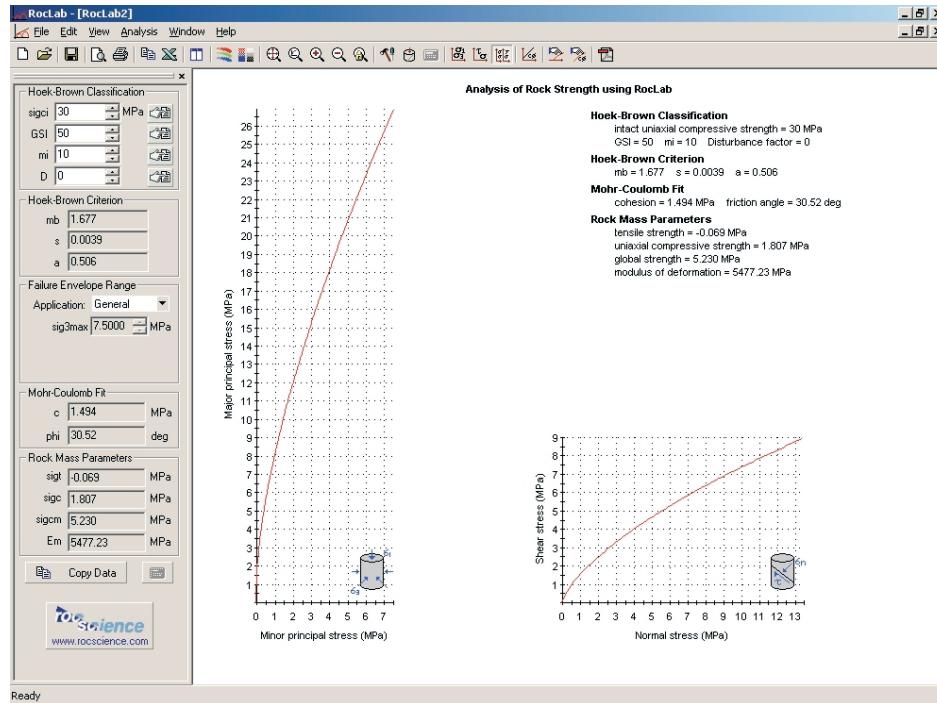
Prólogo

La presente es una versión editada de la traducción al Español realizada por el Profesor José Chacón Montero de la versión original en Inglés de la *Guía del Usuario* del programa **RocLab** de Rocscience, Inc. El programa **RocLab** es de libre distribución y se puede descargar del sitio de internet de Rocscience (www.rocscience.com). Esta traducción, estaba originalmente destinada a los alumnos de 2º año de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos para la asignatura Mecánica de Suelos y Rocas, de la Universidad de Granada. El Profesor Chacón Montero gentilmente ha permitido que Rocscience la editara, y la pusiese a disposición de otros usuarios de **RocLab** de habla hispana.

Bienvenidos a RocLab!

RocLab es un programa de computación que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de rotura Generalizado de Hoek-Brown.

RocLab es un producto de libre distribución desarrollado por Rocscience Inc.



Rocscience produce además otros programas de computación con aplicación a ingeniería geotécnica, civil y minera. Visite www.rockscience.com para obtener información sobre otros productos desarrollados por Rocscience.

Introducción

Uno de los mayores obstáculos que se encuentran en el campo de los modelos numéricos en la mecánica de rocas, es el problema de la definición de datos referentes a las propiedades de los macizos rocosos.

La utilidad de los modelos constitutivos elaborados del material y de los programas de análisis numérico de avanzada disponibles actualmente, está enormemente limitada si el analista no dispone de datos fiables referentes a las propiedades del macizo rocoso.

La última versión del criterio de rotura de Hoek-Brown (Referencia 1), conjuntamente con su implementación en el programa **RocLab**, da un paso considerable en la dirección adecuada para remediar tal situación.

Algunos de los puntos anteriormente confusos en el criterio de rotura de Hoek-Brown quedan ahora resueltos, entre ellos se destacan:

- la aplicabilidad del criterio a macizos rocosos muy poco resistentes, y
- el cálculo de los parámetros equivalentes del criterio de Mohr-Coulomb, a partir de los de la envolvente de rotura de Hoek-Brown.

El programa **RocLab** proporciona una puesta a punto sencilla e intuitiva del criterio de rotura de Hoek-Brown, que permite al usuario una fácil obtención de estimaciones fiables de propiedades del macizo rocoso, así como también la visualización de los efectos que el cambio de parámetros del macizo rocoso produce sobre la envolvente de rotura.

La tarea de determinar propiedades del macizo rocoso no es normalmente un fin en sí mismo. Esta tarea se realiza para proporcionar datos de entrada a los programas de análisis numérico, que requieren definición de las propiedades del material para ejecutar cálculos de estabilidad o análisis de tensiones.

Las propiedades determinadas por **RocLab** se pueden emplear como datos de entrada en programas de análisis numérico tales como **Phase2** (análisis de elementos finitos y diseño de soportes para excavaciones) o **Slide** (análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio límite). Ambos programas están disponibles en Rocscience.

Documentación

Los cálculos del programa **RocLab** se basan en la última versión del criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown, que se detalla en el siguiente artículo (Referencia 1):

Hoek, E., Carranza-Torres, C., and Corkum, B. (2002), Hoek-Brown failure criterion — 2002 edition. *Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto in July 2000.*

El programa **RocLab** incorpora los desarrollos más actualizados del criterio de rotura de Hoek-Brown, tal como están descritos en ese artículo.

El artículo anterior debería ser leído por todos los usuarios de **RocLab!!!** Las definiciones y las ecuaciones para la entrada y salida de resultados en **RocLab**, se discuten en ese artículo —el mismo se encuentra disponible como un documento PDF en el Menú de Ayuda de **RocLab**.

Otro documento útil es el siguiente (Referencia 2):

“A brief history of the Hoek-Brown Failure Criterion”, by Evert Hoek.

Este artículo presenta una breve revisión cronológica de la evolución del criterio de rotura de Hoek-Brown, y presenta además referencias a otros artículos relevantes que se han publicado sobre el tema. Esta es otra lectura recomendada para los todos usuarios de **RocLab**. El artículo está disponible también como documento PDF en el sitio de Internet de Rocscience.

Finalmente, un conjunto de notas escritas por el Dr. Evert Hoek, *Practical Rock Engineering*, (Referencia 3) se encuentra disponible (gratuitamente) en el sitio de internet de Rocscience (www.rockscience.com) como documentos PDF. *Practical Rock Engineering* es una lectura recomendada para todos los estudiantes de Mecánica de Rocas. El capítulo 11 (Propiedades del Macizo Rocoso) debería ser leído también por los usuarios de **RocLab**. Se debe notar que la versión del criterio de rotura de Hoek-Brown que se presenta en la última versión de *Practical Rock Engineering*, ha sido superada por la última versión del criterio (Referencia 1). Sin embargo, la información conceptual contenida en la Referencia 3 es todavía relevante, y provee otros detalles referentes al desarrollo del criterio de rotura de Hoek-Brown.

Cómo se debe utilizar RocLab?

Con el programa **RocLab** se pueden realizar las siguientes tareas:

Determinar Parámetros de Resistencia

Determinar los parámetros de resistencia generalizados de Hoek-Brown (**mb**, **s** y **a**), basados en la introducción de los siguientes datos:

- la resistencia a la compresión no confinada de la roca intacta **sigci**
- el parámetro de la roca intacta **mi**
- el índice de resistencia geológica **GSI**
- el factor de perturbación **D**

Proyectar Envolventes de Rotura

Proyectar la envolvente de rotura de Hoek-Brown en el espacio de tensiones principales y/o en el espacio de tensiones de cizalla y normales.

- Variación interactiva de los parámetros **sigci**, **GSI**, **mi**, **D**, para observar como cambia la envolvente de rotura con cada parámetro.

Estimación de Parámetros de Entrada

Cada uno de los 4 parámetros anteriores (**sigci**, **mi**, **GSI** y **D**), pueden ser convenientemente estimados mediante ábacos y tablas de datos integrados, a partir del tipo de roca, condiciones geológicas, etc.

Resultados de Ensayos Triaxiales

Resultados de ensayos triaxiales de roca intacta se pueden utilizar para determinar los valores de **sigci** y **mi** mediante la técnica de ajuste de Marquardt-Levenberg.

- Los resultados triaxiales se pueden importar desde Microsoft Excel, utilizando el portapapeles (*clipboard*), o desde ficheros de datos tipo texto (ASCII) separados por comas, ficheros tipo RocDat o desde otros ficheros tipo **RocLab**.
- Los datos también se pueden introducir utilizando una hoja de cálculo incluida en el programa **RocLab** mismo.

Parámetros Equivalentes de Mohr-Coulomb

Se puede realizar el cálculo de los parámetros de resistencia equivalentes de Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción).

- La envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb que mejor se ajusta a un rango de tensiones de confinamiento se puede determinar en base al tipo de problema analizado (por ejemplo, problemas de túneles o de estabilidad de taludes).
- La envolvente de rotura equivalente de Mohr-Coulomb se puede proyectar en términos de tensiones principales y/o tensiones de corte y normales.

Muestreador de Tensiones

Se puede muestrear gráficamente las envolventes de Hoek-Brown o de Mohr-Coulomb para determinar la resistencia de cualquier valor concreto de las tensiones (principal, cizalla o normal).

Muestreador de Parámetros de Mohr-Coulomb Instantáneos

Se pueden determinar gráficamente los parámetros instantáneos de Mohr-Coulomb en cualquier punto a lo largo de la envolvente de rotura de Hoek-Brown.

Otros Parámetros del Macizo Rocoso

El programa calcula otros parámetros tales como la resistencia a tracción, la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de deformación.

Unidades

El análisis en **RocLab** se puede realizar en unidades Métricas o Imperiales. En el sistema métrico las unidades de tensión son los Megapascales (MPa). En el Imperial, las tensiones pueden ser las Kilolibras por pie cuadrado (ksf) o las Kilolibras por pulgada cuadrada (ksi). El sistema de unidades se selecciona en el Diálogo de Preparación del Proyecto (*Project Settings*) en el Menú de Análisis (*Analysis*).

Exportar Datos e Imágenes

Se pueden exportar datos para un análisis posterior o para inclusión en informes escritos:

- Copiar los datos y/o proyectarlos al portapapeles para una fácil importación a Microsoft Word o a otro procesador de textos o programa de edición de imágenes.
- Copiar los datos y/o proyectarlos directamente a Microsoft Excel.
- Salvar los gráficos como ficheros de imágenes JPEG o BMP.
- Imprimir y/o visualizar la impresión.

Opciones de Presentación

Numerosas opciones para la personalización de los gráficos están disponibles:

- Cambiar colores, fuentes, grosor de línea.
- Superposición de retículos.
- Añadir título al gráfico y mostrar la introducción de los datos directamente sobre las proyecciones.
- Seleccionar efectos zoom.
- Proyectar líneas Mogi (transición de rotura dúctil a frágil).
- Seleccionar escala de grises para impresoras en blanco y negro.

Visita rápida a RocLab

La siguiente descripción de **RocLab** familiarizará al usuario con las particularidades del programa.

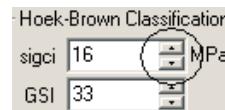
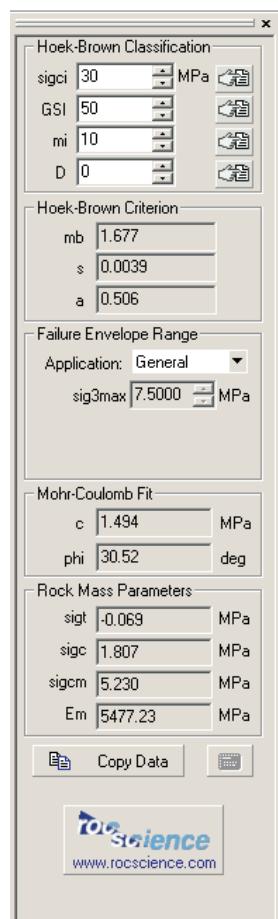
Introducción de Datos

La primera opción para la introducción de datos en **RocLab** es la utilización de la Barra Lateral (*Lateral Bar*) que se muestra mas abajo. La barra lateral se emplea para introducir datos y también para mostrar los parámetros calculados.

Existen varios métodos para introducir datos en **RocLab**:

Entrada de datos interactiva

- Para cambiar los datos de entrada predefinidos, se puede pulsar sobre las flechas  con el ratón. **RocLab** recomputará instantáneamente los resultados.



Esto permitirá al usuario observar, en forma interactiva, el efecto de los cambios de los parámetros, sobre la forma de las envolventes de rotura y demás valores calculados.

Utilización de ventanas de Diálogos de Selección (Pick Dialogs)

- También se pueden introducir datos mediante Diálogos de Selección (*Pick Dialogs*). Cuando se pulsa un botón de la ventana de diálogo , se abrirá otra ventana, por ejemplo una tabla o ábaco, que permitirá estimar un valor del parámetro de entrada.

Cuando se oprime “OK” en la ventana de diálogo de selección, el valor

seleccionado del parámetro se mostrará en la barra lateral de entrada de datos, y **RocLab** realizará automáticamente el cálculo y actualizará los valores de salida y las envolventes de rotura.

Empleo del teclado



- Si se entran con el teclado los valores numéricos en los cuadros de edición de la barra lateral, los cálculos no se harán automáticamente. Para recalcular los parámetros resultantes del macizo rocoso y las correspondientes envolventes de rotura, se debe seleccionar la opción **Computar** (*Compute*) que se encuentra en la barra de herramientas, o en el menú de análisis.

Entrada de datos de ensayos triaxiales



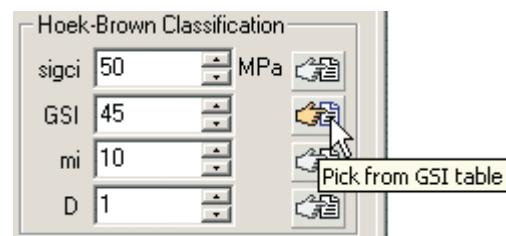
- Se pueden determinar además valores **sigci** y **mi** a partir de datos de laboratorio de ensayos triaxiales de roca intacta. Esto se hace con la opción **Utilización de Datos de Laboratorio** (*Use Lab Data*) en el menú de análisis, tal como se describe a continuación. Cuando se seleccione **Apply** o **OK** en la ventana de diálogo **Calcular sigci, mi a partir de datos de laboratorio** (*Calculate sigci, mi from Lab Data*), **RocLab** computará los valores de **mi** y **sigci** y los mismos se utilizarán para computar valores de salidas y las correspondientes envolventes de rotura.

Estimación de los Parámetros de Entrada

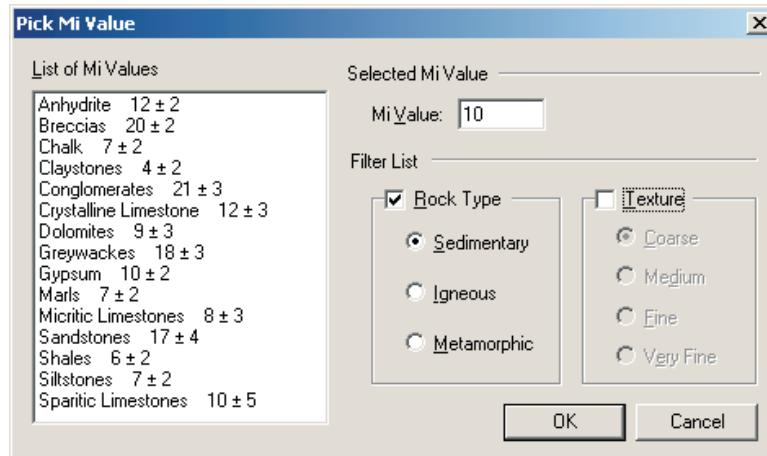


Cada uno de los parámetros utilizados como entrada en el criterio de Hoek-Brown — **sigci**, **mi**, **GSI** y **D** — se pueden estimar mediante tablas y ábacos incorporados en **RocLab**.

A estas tablas y ábacos se puede acceder seleccionando el Botón Selector (*Pick Button*) ubicado junto a los cuadros de edición de la introducción de datos en la barra lateral.



Cuando se seleccione un botón selector, aparecerá una tabla o ábaco, que permitirá determinar un valor adecuado para el parámetro deseado. Por ejemplo, los diálogos para la estimación de **mi** y **GSI** (Rock Type = General) se muestran abajo.



Una vez que se ha determinado un valor (por ejemplo de **mi** o **GSI**), se debe seleccionar OK en la ventana de diálogo. El valor se introducirá entonces de forma automática en el área de introducción de datos de la barra lateral, y **RocLab** recomputará los resultados (es decir, recomputará los parámetros de salida y las envolventes de rotura correspondientes a los datos de entrada que se han seleccionado)

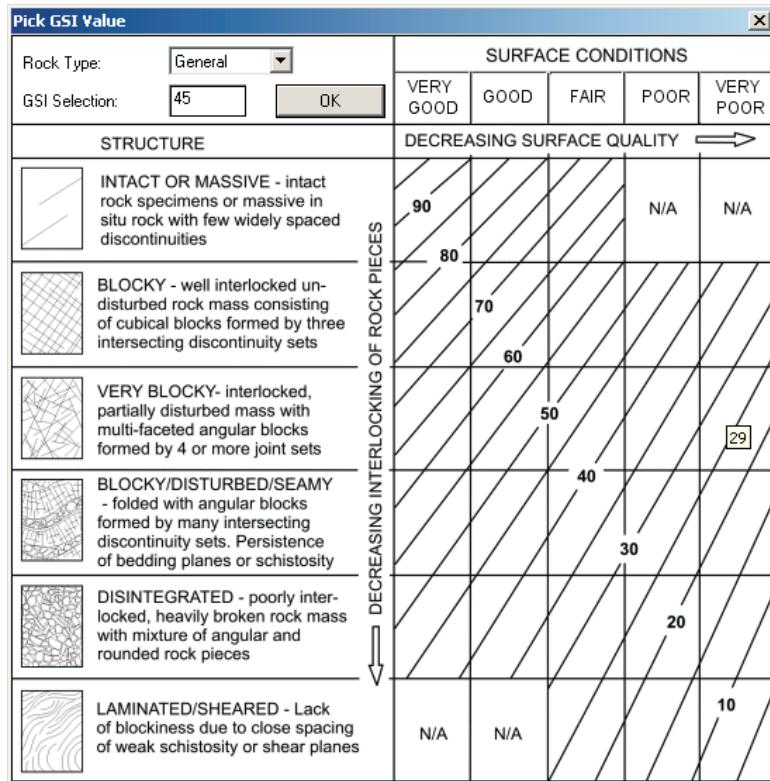


Diagrama de clasificación **GSI** (Tipo de Roca = General)

Se recomienda al usuario experimentar con estas ventanas de selección, oprimiendo el botón selector para cada uno de los datos de entrada **sigci**, **mi**, **GSI** y **D**.

Se podrá observar que existen dos diagramas de **GSI** diferentes:

- Un diagrama para tipos generales de macizos rocosos.
- Otro diagrama para tipos de macizos rocosos homogéneos y débiles tales como el flysch, que extienden el rango de validez de **GSI** hasta valores tan bajos como 5.

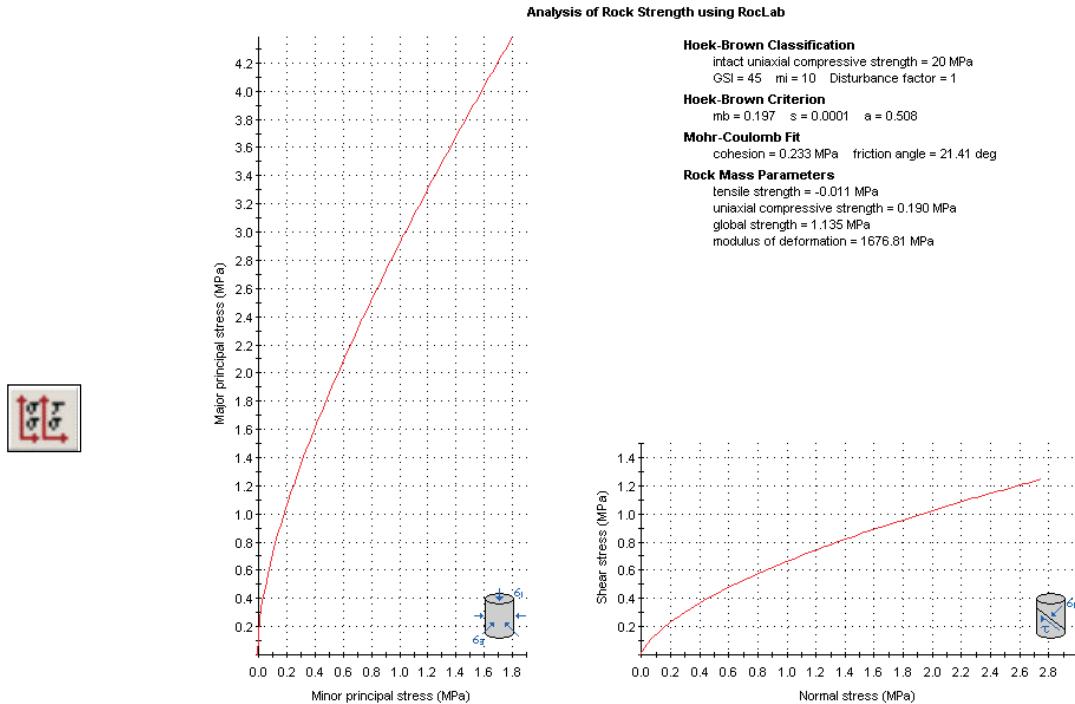
Para mayor información sobre los parámetros de clasificación de Hoek-Brown, **sigci**, **mi**, **GSI** y **D**, se recomienda consultar la Referencia 1.

Proyección de Envolventes de Rotura

RocLab proyectará las envolventes de rotura de los macizos rocosos en:

- el espacio de tensiones principales (σ_1 vs. σ_3)
- el espacio de tensiones de cizalla y de tensiones normales (τ_s vs. σ_n)

Las proyecciones corresponderán a los datos especificados corrientemente en la barra lateral.



Por defecto, se proyectarán AMBAS, las gráficas en términos de tensiones principales y en términos de tensiones de cizalla y normales. Sin embargo, el usuario puede seleccionar activar una sola de estas representaciones a la vez. Esto se podrá hacer escogiendo la proyección deseada en la barra de herramientas, el menú de análisis, o el menú que se activa oprimiendo el botón derecho del ratón.



Varios tipos de representaciones y opciones de análisis están disponibles, tales como:

- Envolvente equivalente de Mohr-Coulomb.
- Selector de tensiones / Selector instantáneo de Mohr-Coulomb.
- Personalización del aspecto de la proyección con Display Options (por ejemplo, para insertar un retículo, especificar espesor de línea, fuentes, etc), y activar el efecto del zoom.

Menú del botón derecho del ratón

CONSEJO (TIP) – Casi todas las opciones de representación están también disponibles en el menú que se activa al presionar el botón derecho del ratón, si esto se hace sobre cualquier zona del área de proyección.

Estimación de Parámetros de Hoek-Brown

Dado un conjunto de datos de entrada (**sigci**, **GSI**, **mi** y **D**), **RocLab** calculará los parámetros del criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown (**mb**, **s** y **a**). Los valores se presentarán en la barra lateral según se indica en la figura de más abajo.

Las envolventes de rotura de Hoek-Brown que se proyectan en **RocLab**, se generan utilizando estos valores de **mb**, **s** y **a**.

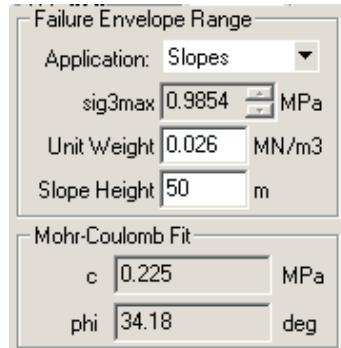
The screenshot shows two sections of the RocLab software interface. The top section, 'Hoek-Brown Classification', contains four input fields: 'sigci' with value 30 (MPa), 'GSI' with value 50, 'mi' with value 10, and 'D' with value 0. Each input field has a unit indicator (MPa, GSI, mi, D) and a small icon to its right. The bottom section, 'Hoek-Brown Criterion', contains three output fields: 'mb' with value 1.677, 's' with value 0.0039, and 'a' with value 0.506. The 'mb' field is highlighted with a gray background.

Estos parámetros se calculan utilizando la última versión del criterio de rotura de Hoek-Brown, de acuerdo con la Referencia 1.

Equivalencia con el Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb

Además de los parámetros del criterio de rotura de Hoek-Brown (**mb**, **s** y **a**), **RocLab** siempre calcula los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) del macizo rocoso.

Puesto que la mayor parte del software de ingeniería se escribe aún en términos del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, el cálculo de parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb a partir de los parámetros de Hoek-Brown es una particularidad útil del programa **RocLab**.



La envolvente equivalente de Mohr-Coulomb puede verse al seleccionar la opción **Envoltura de Rotura de Mohr-Coulomb** (*Mohr-Coulomb Envelope*) en la barra de herramientas o en el menú de análisis.



Rango de la envolvente de rotura

Es importante destacar que la opción **Rango de Envolvente de Rotura** (*Failure Envelope Range*) en la barra lateral tiene un efecto directo en los parámetros de Mohr-Coulomb calculados.

- Para más detalles sobre el procedimiento de ajuste de la envolvente de Mohr-Coulomb, y el significado de la opción Failure Envelope Range, se recomienda ver la Referencia 1 —sección 4: Mohr-Coulomb Criterion, y sección 6: Determination of σ_3^{max} .
- Cuando en la barra lateral la opción *Failure Envelope Range* = General, el límite superior del rango de ajuste es $\sigma_3^{max} = \sigma_{ci}/4$. Esto se basa en la observación empírica de que el rango de esfuerzos asociado con la rotura frágil ocurre para valores de σ_3 inferiores a un cuarto del valor de σ_{ci} .
- Cuando la opción *Failure Envelope Range* = Custom, se puede introducir cualquier valor de σ_3^{max} .
- El rango de valores de la Envolvente de Rotura NO tiene efecto sobre los parámetros de Hoek-Brown calculados.

Otros Parámetros del Macizo Rocoso

En la parte inferior de la barra lateral se podrá observar que se calculan además los siguientes parámetros del macizo rocoso:

- **sigt** (resistencia a tracción del macizo rocoso)
- **sigc** (resistencia compresiva uniaxial del macizo rocoso)
- **sigcm** (resistencia compresiva global del macizo rocoso)

- **Em** (módulo de deformación del macizo rocoso)

Rock Mass Parameters		
sigt	0.014	MPa
sigc	0.352	MPa
sigcm	2.302	MPa
Em	2002.05	MPa

La definición de estos parámetros, y las ecuaciones empleadas para calcularlos se encuentran explicados en la Referencia 1.

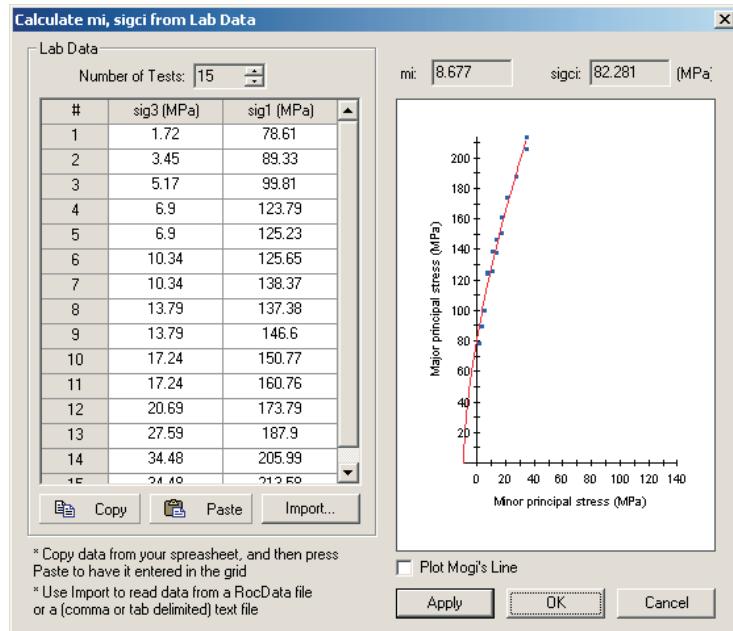
En particular, se observará que en **RocLab** se calculan dos valores de la resistencia a la compresión del macizo rocoso – **sigc** y **sigcm**. La definición y empleo de esos parámetros se detallan en la Referencia 1 – section 5: *Rock Mass Strength*.

Datos de Laboratorio del Ensayo Triaxial

Otra característica de **RocLab** es la capacidad de introducción de datos de ensayos triaxiales (pares de valores σ_1 , σ_3), para determinar los parámetros de la roca intacta **sigci** y **mi**. Esto se hace como sigue:



1. Seleccione la opción **Utilización de Datos de Laboratorio (Use Lab Data)** en el menú de análisis o en la barra de herramientas.
2. Los datos se pueden introducir en una hoja de cálculo (implementadas en el programa mismo), o se pueden importar de un fichero, como se muestra en la ventana de más abajo.
3. Sobre los datos introducidos se genera entonces una curva de ajuste, mediante la técnica de ajuste Marquardt-Levenberg, y se obtienen así valores de **sigci** y **mi**.
4. Despues de introducir los datos, si se selecciona OK en la ventana de diálogo, se emplearán los valores calculados de **sigci** y **mi** para calcular los parámetros de resistencia y la envolvente de rotura de Hoek-Brown.



Se recomienda siempre la obtención de los valores de **sigci** y **mi** a partir de ensayos triaxiales de laboratorio, si datos de este ensayo están disponibles. Es de destacar que no siempre son necesarios demasiados resultados de ensayos triaxiales; buenos resultados (de **sigci** y **mi**) se pueden obtener a partir de unos pocos resultados triaxiales (por ejemplo, a partir de 6 o 7 pares de valores de tensiones principales).

Si los resultados de ensayos triaxiales no están disponibles, se pueden obtener siempre valores de **sigci** y **mi** en **RocLab**, utilizando los Diálogos de Selección (*Pick Dialogs*) descritos anteriormente.

Ejemplo 1 – Túnel, sin Perturbar (D=0)

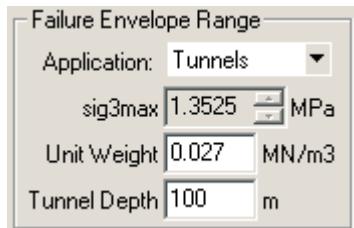
Considérese un macizo rocoso no perturbado en el que se excava un túnel a una profundidad de 100 metros, con los siguientes parámetros de clasificación de Hoek-Brown:

Hoek-Brown Classification

sigci	50	MPa	<input type="button" value="File"/>
GSI	45		<input type="button" value="File"/>
mi	10		<input type="button" value="File"/>
D	0		<input type="button" value="File"/>

Introduzca estos datos en la barra lateral del área de entrada de datos. Introduzca además los siguientes datos para determinar el Rango de Envolvente

de Rotura (σ_3^{max}). Estos valores se emplearán para los cálculos de los valores equivalentes de Mohr-Coulomb:



Failure Envelope Range

Application: Tunnels

sig3max: 1.3525 MPa

Unit Weight: 0.027 MN/m³

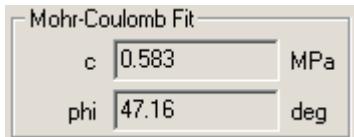
Tunnel Depth: 100 m



A continuación pulse **Compute**.

Los datos de salida se mostrarán en la barra lateral, y las envolventes de rotura se calcularán.

Observe los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb que se han calculado:



Mohr-Coulomb Fit

c: 0.583 MPa

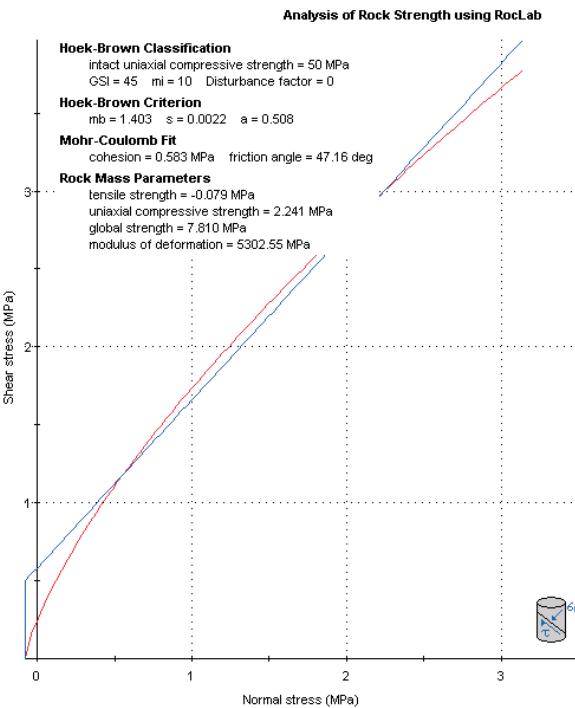
phi: 47.16 deg



Se puede observar la envolvente correspondiente a estos parámetros seleccionando la opción de Envolvente de Mohr-Coulomb, en la barra de herramientas o en el menú de análisis.



Para obtener una mejor presentación de la envolvente de Mohr-Coulomb, se puede representar solamente la proyección de tensiones normales en función de las tensiones de cizalla. Seleccione la opción (Tension) Normal vs. Cizalla *Normal vs. Shear* en el menú de análisis o en la barra de herramientas. Esto ocultará la proyección de tensiones principales y mostrará solamente el gráfico de tensión normal vs. cizalla, maximizado, en la presentación.



Si se examina la envolvente de Mohr-Coulomb, se pueden confirmar gráficamente los valores calculados de cohesión, ángulo de fricción, y la resistencia a tracción del macizo **sigt**. La resistencia a tracción es el valor negativo de tensión normal, en el origen de la envolvente de rotura.

Ejemplo 2 – Talud, Perturbado (D=1)

Considérese un macizo rocoso con los mismos parámetros básicos utilizados en el ejemplo anterior, esta vez para un talud de 100 metros de altura en roca muy perturbada, con un factor de perturbación D=1.

Introduzca el factor de perturbación D=1.

Hoek-Brown Classification			
sigci	50	MPa	[]
GSI	45	[]	[]
mi	10	[]	[]
D	1	[]	[]

Introduzca los siguientes datos para determinar el rango de la envolvente de rotura (σ_3^{max}):

Failure Envelope Range

Application: Slopes

sig3max 1.9526 MPa

Unit Weight 0.027 MN/m³

Slope Height 100 m



A continuación pulse **Compute**.

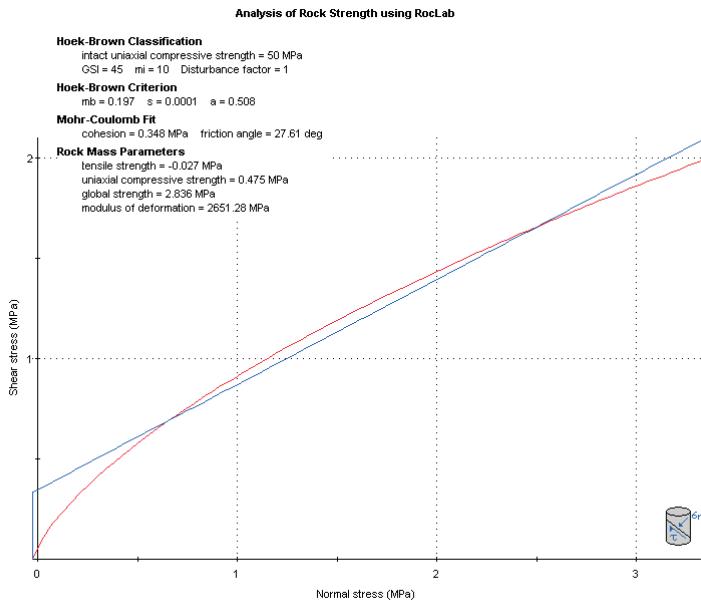
Los datos de salida se mostrarán en la barra lateral, y las envolventes de rotura correspondientes también se calcularán.

Note los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb que se han calculado:

Mohr-Coulomb Fit

c 0.348 MPa

phi 27.61 deg



Compare los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb y las envolventes de rotura computadas para los dos ejemplos descritos anteriormente. La comparación muestra el efecto significativo que el Factor de Perturbación **D**, puede tener sobre la resistencia del macizo rocoso calculada.

Para mas información sobre el Factor de Perturbación **D**, se recomienda consultar la Referencia 1 – Sección 7: *Estimation of Disturbance Factor D*.

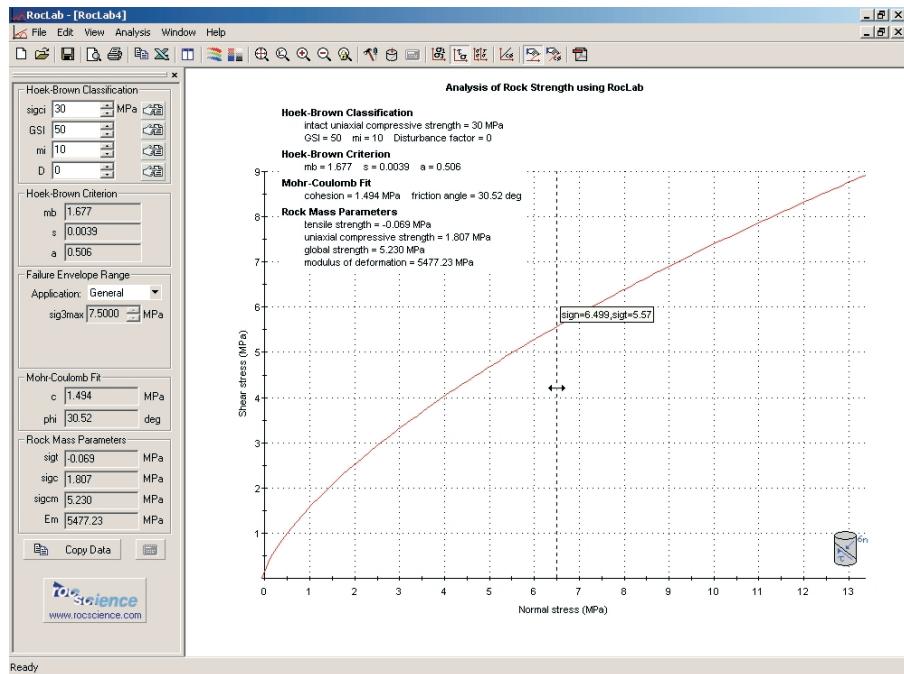
Muestreador de Tensiones en Puntos de la Envoltura

La opción **Stress Sampler** permite al usuario obtener gráficamente las coordenadas exactas de cualquier punto a lo largo de las envolventes de rotura. Esto se hace del siguiente modo:



1. Seleccione la opción **Stress Sampler** de la barra de herramientas, en el menú correspondiente al botón derecho del ratón, o en el menú de análisis.
2. Pulse una vez el botón izquierdo del ratón, sobre cualquier valor de σ_3 (en el gráfico de tensiones principales), o sobre cualquier valor de tensión normal (en el gráfico de tensiones normales y de cizalla).
3. Sobre los puntos en que se ha pulsado el ratón aparecerán las coordenadas de tensiones correspondientes a los valores de σ_3 o de tensión normal. Una línea vertical de puntos aparece en los gráficos para señalar la ubicación.

4. Alternativamente, si se pulsa y se MANTIENE pulsado el botón izquierdo del ratón sobre cualquiera de los gráficos, y se ARRASTRA el ratón hacia la izquierda o la derecha, las coordenadas de tensiones de las envolventes de rotura se mostrarán continuamente, conforme se mueva el ratón.
5. NOTA: si se está visualizando la proyección de envolventes equivalentes de Mohr-Coulomb, se mostrarán entonces, al mismo tiempo, AMBAS, las coordenadas de tensiones de Hoek-Brown y las de Mohr-Coulomb.



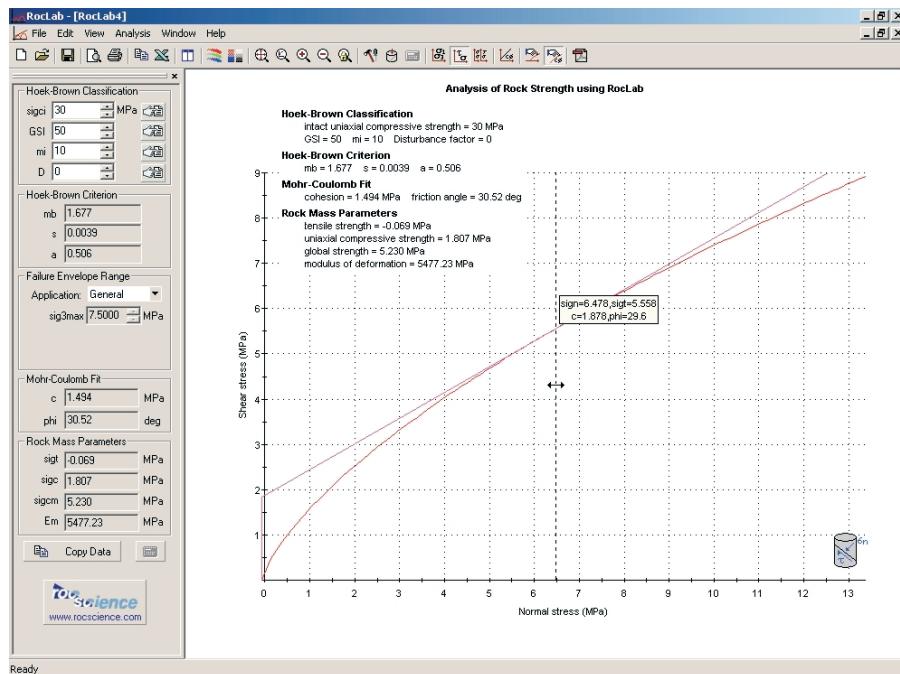
Muestreador de Parámetros de Mohr-Coulomb Instantáneos

La opción **Muestreador de Parámetros de Mohr-Coulomb Instantáneos** (*Instantaneous Mohr-Coulomb Sampler*) permite al usuario obtener gráficamente, los parámetros de Mohr-Coulomb, cohesión y ángulo de fricción, PUNTUALES, en cualquier parte de la envolvente de Hoek-Brown. Esto se hace de la siguiente forma:



1. Seleccione la opción **Muestreador MC Instantáneo** (*Instantaneous MC Sampler*) de la barra de herramientas, el menú del botón derecho del ratón o el menú de análisis.
2. Pulse una vez el botón izquierdo del ratón, en cualquier valor de σ_3 (en el gráfico de tensiones principales), o en cualquier valor de tensión normal (en el gráfico de tensiones normales y de cizalla).

3. La envolvente instantánea de Mohr-Coulomb (línea tangencial) aparecerá en los gráficos, para el valor de σ_3 (o de tensión normal), sobre la que se pulsó el ratón. Los valores instantáneos de cohesión y ángulo de fricción se mostrarán en las gráficas, así como también las coordenadas de tensión. Una línea vertical de puntos aparecerá en los gráficos, para señalar la ubicación de los parámetros instantáneos.
4. Alternativamente, si pulsa y se MANTIENE pulsado el botón izquierdo del ratón sobre cualquiera de los gráficos, y se ARRASTRA el ratón hacia la izquierda o la derecha, la envolvente instantánea de Mohr-Coulomb y las coordenadas de las tensiones, se mostrarán continuamente, conforme se mueva el ratón.



Exportación de Datos e Imágenes

Los resultados de los análisis de **RocLab** y las proyecciones de envolventes de rotura se pueden exportar a otros programas, para inclusión en informes, o análisis posteriores, etc. Esto se puede realizar de varias formas.

- La opción **Copiar Datos** (*Copy Data*) en la barra lateral o en el menú **Editar** (*Edit*), copiará los contenidos de esta barra (es decir todos los parámetros de entrada y salida) al portapapeles (*clipboard*). Desde el portapapeles será posible pegarlo (*paste*) a un procesador de textos o a

una hoja de cálculo. Esto permitirá extraer cómodamente un resumen del análisis.



- La opción **Copiar** (*Copy*) en la barra de herramientas o en el menú **Editar** (*Edit*), copiará una imagen de la envolvente de rotura que se esté visualizando al portapapeles, y desde allí, esta imagen se podrá pegar a los informes o programas de edición de imágenes, etc.
- Las proyecciones de envolventes de rotura pueden también grabarse directamente como ficheros de tipo JPEG o BMP, con la opción **Exportar Fichero Gráfico** (*Export Image File*). Esta opción está disponible en el menú **Fichero** (*File*), o en el menú correspondiente al botón derecho del ratón.

Exportación rápida a Excel

La característica de exportación más potente es la siguiente: con un solo click del ratón, todos los datos Y las proyecciones gráficas pueden exportarse a Microsoft Excel. Esto se hace de la forma siguiente:



1. Seleccione en la barra de herramientas el botón **Exportar a Excel** (*Export to Excel*).
2. Si tiene instalado Excel en su ordenador, el programa Excel se iniciará automáticamente, y todos los análisis de datos de entrada y salida se exportarán automáticamente a una hoja de cálculo de Excel.
3. Los gráficos de envolvente de rotura se generarán entonces en Excel.
4. Todo ello sucede con un simple click del ratón !!!

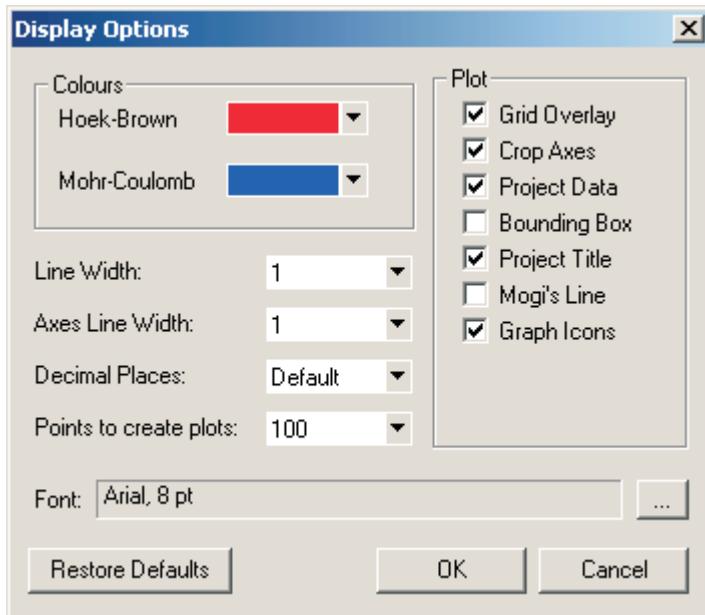
Observe que los gráficos generados en Excel corresponden a las envolventes de rotura que esté representando **RocLab** en ese momento. Por ejemplo, si solamente se proyecta el gráfico de tensión normal-cizalla, entonces solo ese gráfico y los datos correspondientes se generarán en Excel. Si se están proyectando ambos gráficos (tensiones principales y normal-cizalla) entonces los dos gráficos se generarán en Excel. También, si ha proyectado la envolvente equivalente de Mohr-Coulomb, lo mismo se hará en Excel. Finalmente observe que el número de puntos empleados para crear cada envolvente de rotura está controlado por el diálogo **Opciones de Representación** (*Display Option*) en el menú Visualizar (*View*) de **RocLab**.

Opciones para la Representación en Pantalla

El aspecto de los gráficos de la Envoltura de Rotura se puede personalizar con las opciones de visualización, zoom y otras.



- La opción **Opciones de Representación** (*Display Options*) está disponible en la barra de herramientas, en el menú de **Visualización** (*View*), y también en el menú correspondiente al botón derecho del ratón (si este se pulsa en cualquier punto de la proyección de la envolvente de rotura).



La mayoría de las opciones en la ventana de Opciones de Representación son auto-explicativas, por lo que se recomienda al usuario experimentar con ellas. Sin embargo, señalaremos el propósito de las siguientes opciones:

Línea Mogi

La línea Mogi define la relación entre las tensiones principales efectivas mayor y menor para la cual se produce la transición de la rotura frágil a la rotura dúctil. Esta línea se define sencillamente como $\sigma_1/\sigma_3 = 3.4$, y se proyecta como una línea verde sobre la representación de tensiones principales, cuando se selecciona la opción Línea Mogi en la ventana de Opciones de Representación (**Display Options**).

- Si la envolvente de tensiones principales queda SOBRE la línea Mogi, esto indica un modo de rotura frágil.
- Si la envolvente de tensiones principales queda BAJO la línea Mogi, esto indica un modo de rotura dúctil (que puede ocurrir, por ejemplo, para valores bajos de GSI).

Opción de Zoom

La opción **Efecto de Zoom** (*Zoom Extents*) modificará automáticamente la escala de los ejes de la proyección de las envolventes de rotura, de manera tal que se podrán proyectar todas las envolventes de rotura posibles, correspondientes a los valores de **sigci** que se hayan seleccionado.

Esto corresponde a valores máximos de **GSI** (= 100) y **mi** (= 40).



1. Para demostrarlo, seleccione la opción **Efecto de Zoom** (*Zoom Extents*).
2. Use las flechas interactivas, para incrementar el valor de **GSI** a 100, y el valor de **mi** a 40.
3. Observe los gráficos de la envolvente de rotura. Cuando **GSI** = 100 y **mi** = 40, la extensión de la envolvente de tensiones principales corresponderá a la extensión máxima calculada automáticamente por la opción **Efecto de Zoom** (*Zoom Extents*).

La opción **Efecto de Zoom** se encontrará útil para demostraciones interactivas de los cambios de los parámetros sobre la envolvente de rotura.

Referencias

1. Hoek, E., Carranza-Torres, C., and Corkum, B. (2002), Hoek-Brown failure criterion — 2002 edition. *Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto, July 2002*.
2. Hoek, Evert, (2002), A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion, unpublished document.
3. Hoek, Evert, Practical Rock Engineering — An Ongoing Set of Notes, available on the Rocscience website, www.rocscience.com.