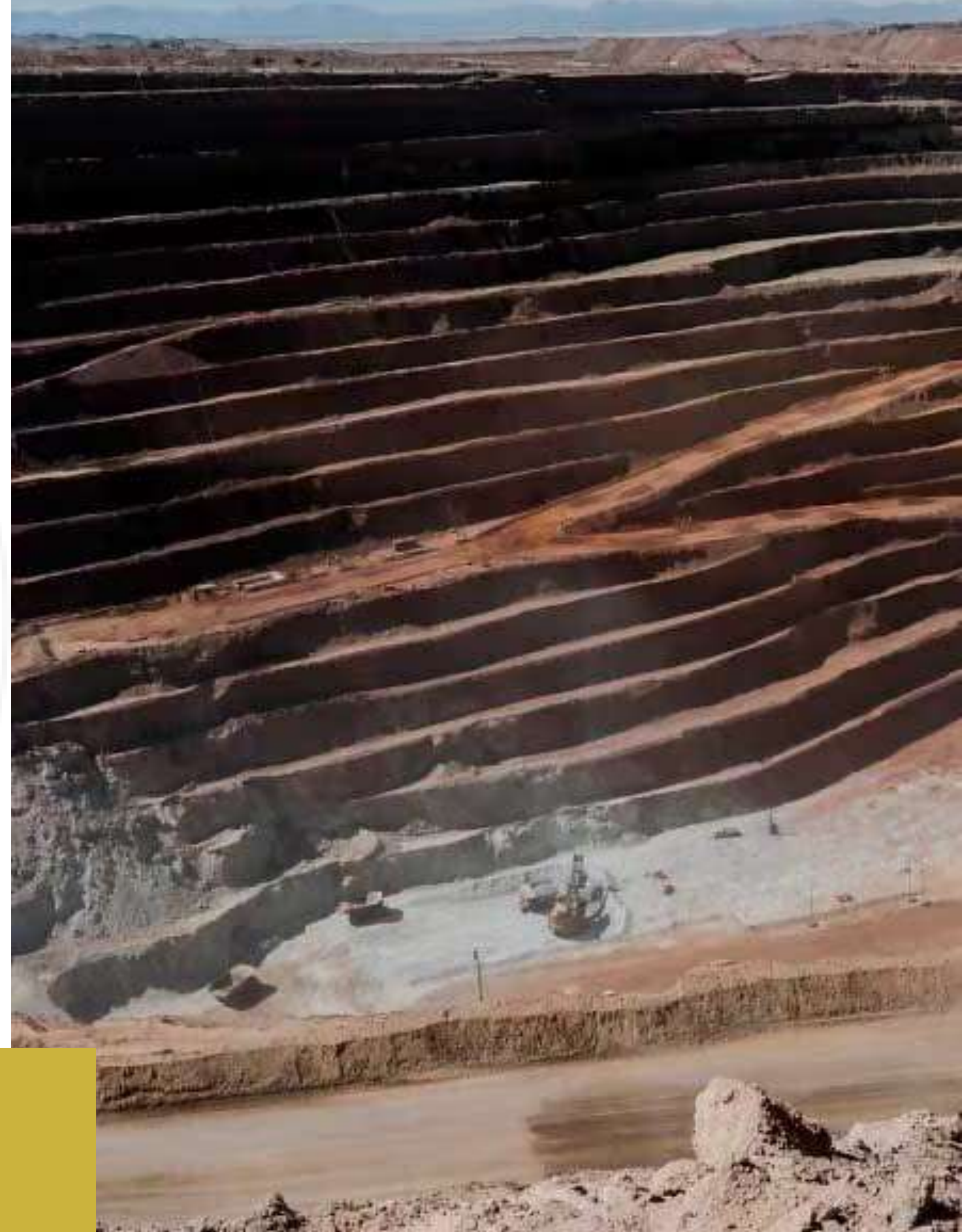




# **Análisis y Evaluación de la Estabilidad de Taludes**

# ÍNDICE

- Métodos de análisis de estabilidad: métodos analíticos y numéricos.
- Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, PLAXIS.
- Factor de seguridad





## 1.- Métodos de análisis de estabilidad: métodos analíticos y numéricos.

En el análisis y evaluación de la estabilidad de taludes, los métodos de análisis se dividen principalmente en dos categorías: **métodos analíticos y métodos numéricos.**

Cada uno tiene aplicaciones y ventajas específicas, dependiendo de la complejidad del talud, las condiciones del terreno y los recursos disponibles.





## 1.- Métodos de análisis de estabilidad: métodos analíticos y numéricos.

### **Método del equilibrio límite**

**(LEM):** Es uno de los más utilizados y se basa en el concepto de que un talud falla cuando las fuerzas de resistencia interna (cohesión y fricción) son menores que las fuerzas que tienden a desestabilizarlo (peso del material, fuerzas externas).

El objetivo es calcular un factor de seguridad (FS), definido como la razón entre las fuerzas resistentes y las fuerzas deslizantes.



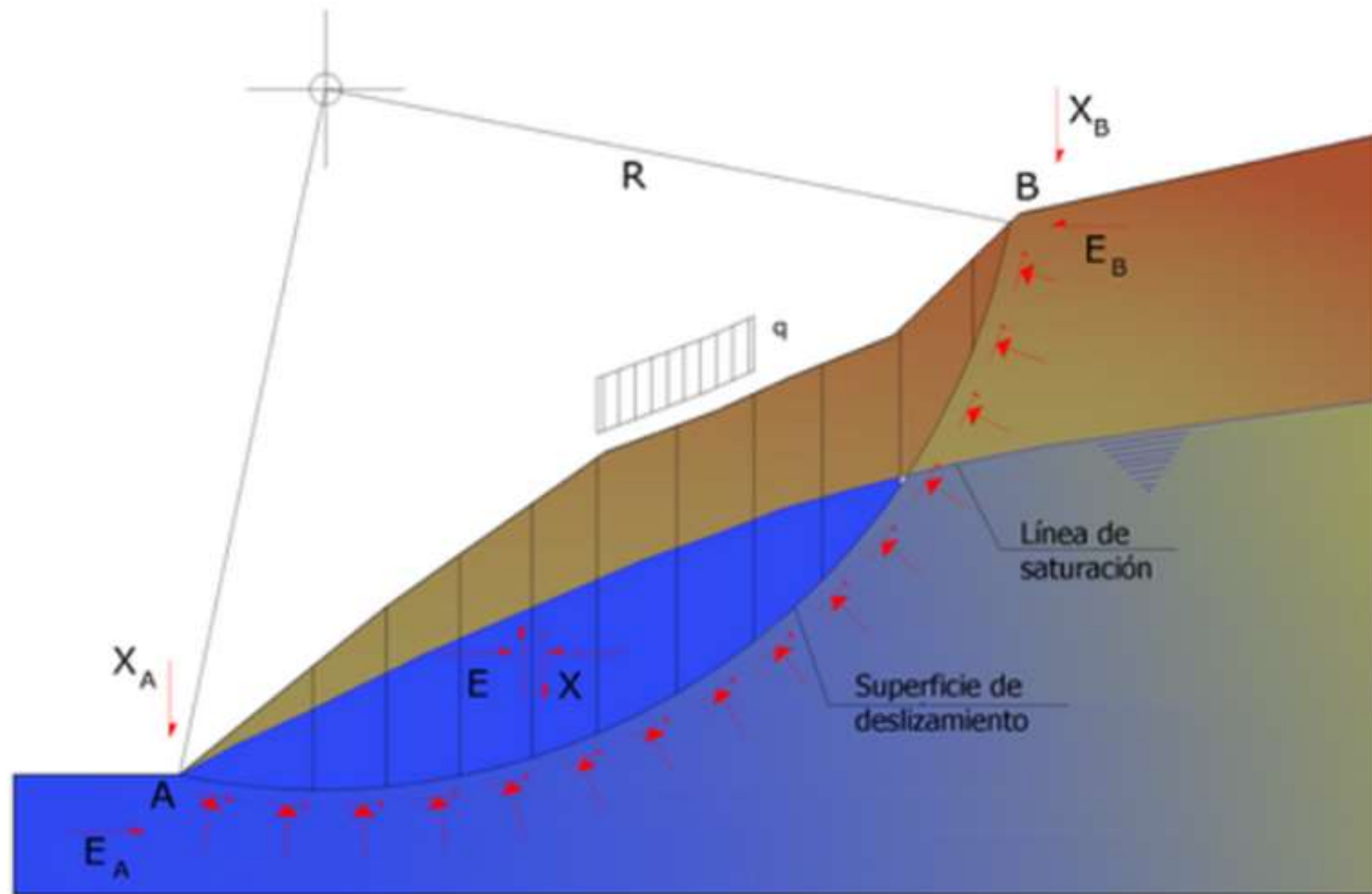
# Método del equilibrio límite (LEM)

$$FS = \frac{T_f}{T}$$

Un talud como un bloque de material sobre una pendiente. Este bloque está sujeto a fuerzas como la gravedad y la resistencia del material.

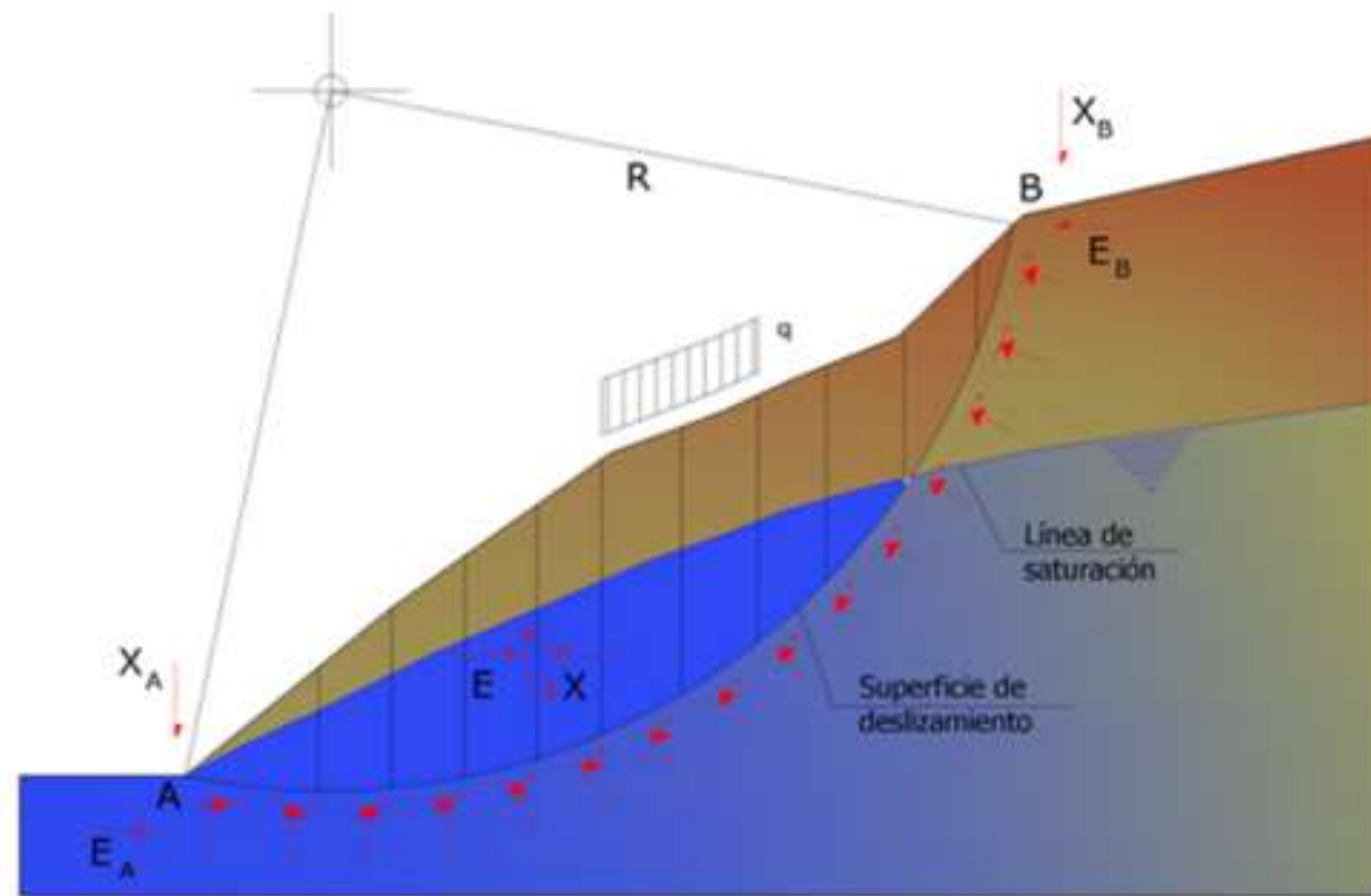
El método del equilibrio límite asume que el bloque se deslizará a lo largo de una superficie de falla potencial.

Esta superficie puede ser circular, plana o de otra forma, dependiendo de las características del material y del talud.



Representación de una sección de cálculo de un talud

# Método del equilibrio límite (LEM)



Representación de una sección de cálculo de un talud

## PROCEDIMIENTO GENERAL

### Definición de la superficie de falla

1

Se asume una forma para la superficie de falla, como un arco de círculo o una línea recta.

### División del bloque

2

El bloque de suelo por encima de la superficie de falla se divide en rebanadas verticales.

### Cálculo de fuerzas

3

Se calculan las fuerzas actuando sobre cada rebanada, incluyendo el peso, las fuerzas interslice y las fuerzas externas (como la presión del agua).

### Cálculo del factor de seguridad

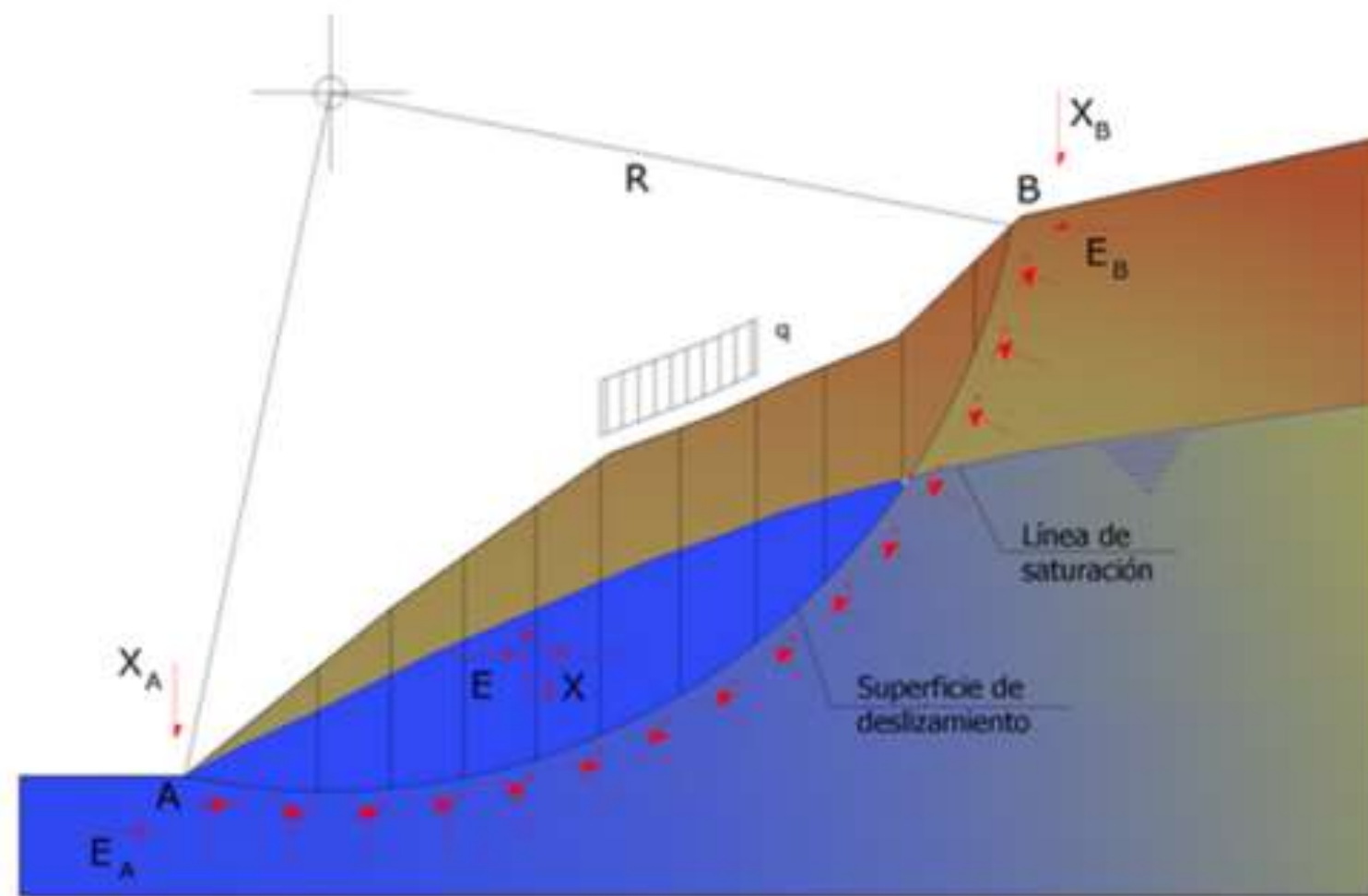
4

El factor de seguridad se define como la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas deslizantes. Un factor de seguridad mayor a 1 indica que el talud es estable.

### Optimización

5

Se varía la forma de la superficie de falla para encontrar la que produce el menor factor de seguridad. Esta superficie de falla representa la condición más crítica.



*Representación de una sección de cálculo de un talud*

## MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE COMUNES

## Método de Fellenius

1

Asume una superficie de falla circular y considera fuerzas normales e intersecciones en los límites de las rebanadas.

## Método de Bishop

2

Una mejora del método de Fellenius, considera el efecto de las fuerzas intersticiales.

## Método de Morgenstern-Price

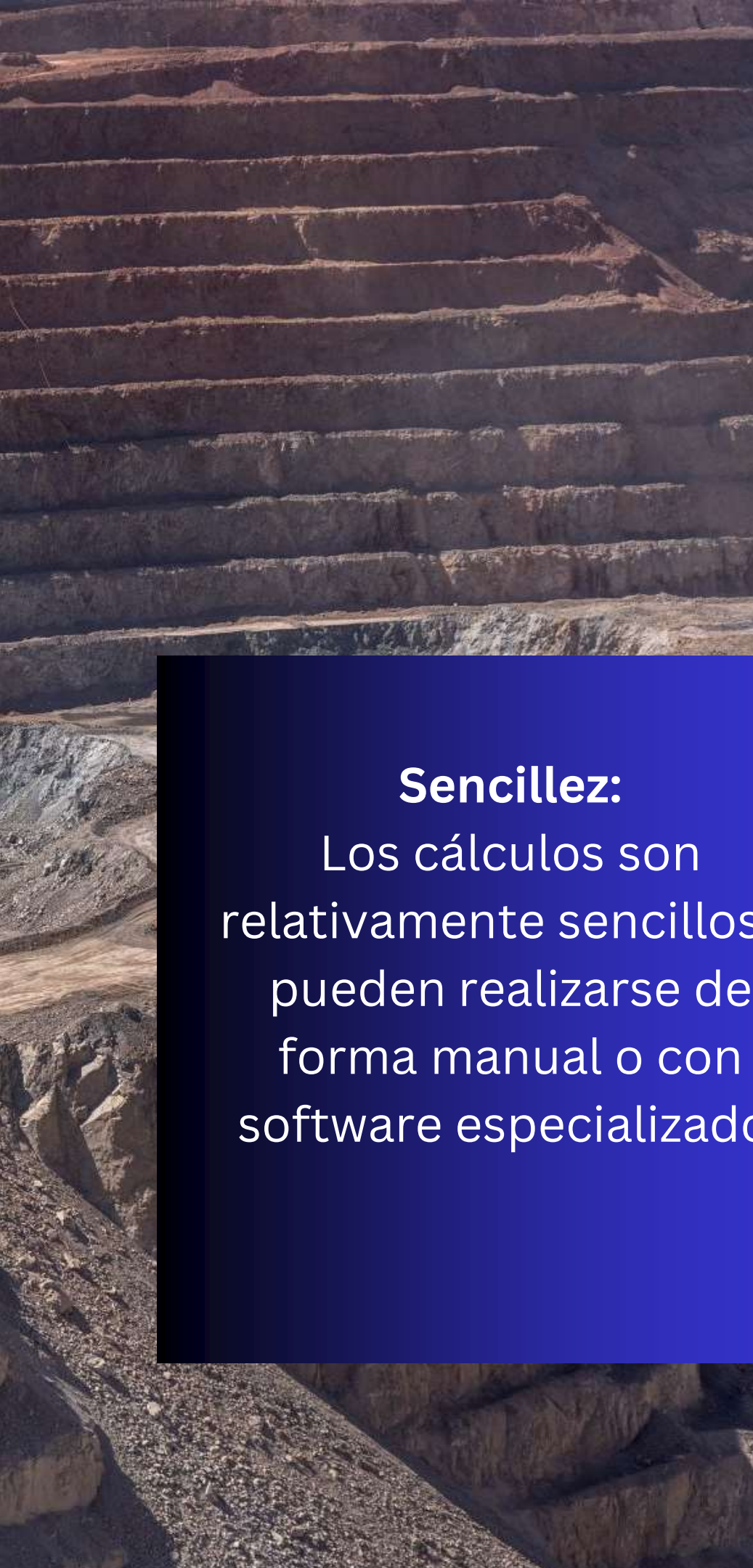
3

Permite analizar superficies de falla de cualquier forma y considera fuerzas normales e intersecciones variables a lo largo de la superficie de falla.

## Método de Sarma

4

Permite determinar la aceleración sísmica necesaria para que el talud se vuelva inestable.



# Método del equilibrio límite (LEM)

## Ventajas del Método del Equilibrio Límite

### **Sencillez:**

Los cálculos son relativamente sencillos y pueden realizarse de forma manual o con software especializado.



### **Versatilidad:**

Se puede aplicar a una amplia variedad de condiciones de suelo y taludes.



### **Económico:**

No requiere de grandes recursos computacionales.



# Método del equilibrio límite (LEM)

## Limitaciones del Método del Equilibrio Límite

### Ideas simplificadas:

Asume que el material es homogéneo e isótropo, y que la superficie de falla es perfectamente definida.



**No considera el comportamiento no lineal del material:** No considera efectos como la plasticidad o la fluencia.



**Dependencia de la forma de la superficie de falla:** La elección de la forma de la superficie de falla puede afectar significativamente los resultados.



# Método del equilibrio límite (LEM)

## Aplicaciones

El método del equilibrio límite se utiliza ampliamente en geotecnia para:

- **Evaluar la estabilidad de taludes naturales y artificiales.**
- **Diseñar taludes.**
- **Monitorear la estabilidad de taludes existentes.**
- **Evaluar el riesgo de deslizamientos.**

**En resumen,** el método del equilibrio límite es una herramienta valiosa para evaluar la estabilidad de taludes. Si bien tiene algunas limitaciones, sigue siendo ampliamente utilizado debido a su simplicidad y versatilidad.



## 1.- Métodos de análisis de estabilidad: métodos analíticos y numéricos.

### Métodos Numéricos

Los métodos numéricos son más complejos y detallados que los analíticos, ya que permiten simular situaciones más realistas, incluyendo geometrías complejas, variaciones en las propiedades del terreno y condiciones de carga variables.

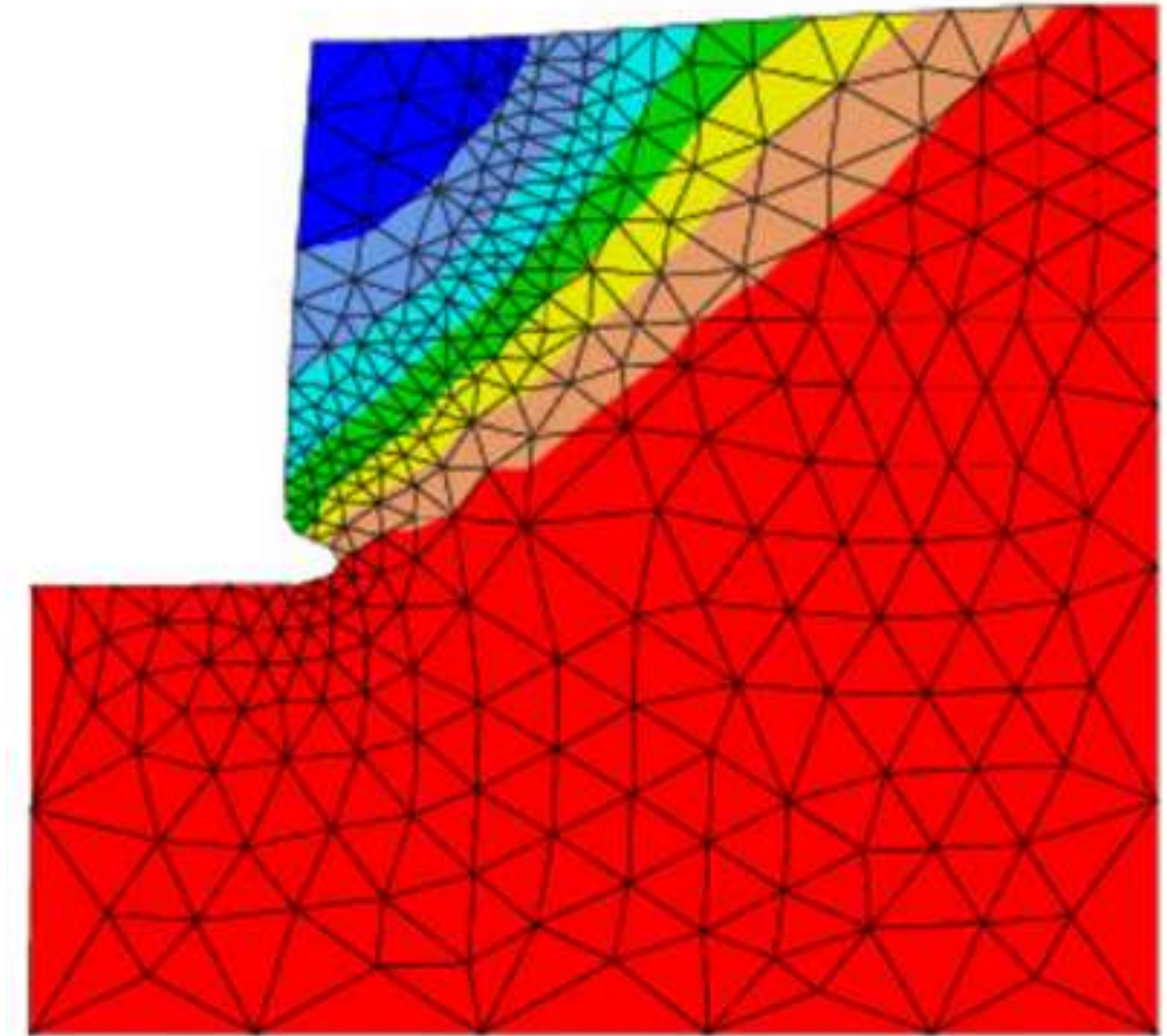
Estos métodos requieren software especializado y generalmente más datos y tiempo de procesamiento.



# Métodos Numéricos

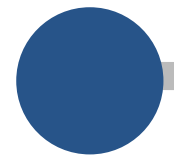
**Método de Elementos Finitos (FEM):** Este método divide el talud en pequeños elementos y calcula la respuesta de cada uno bajo ciertas condiciones de carga.

Es particularmente útil para analizar deformaciones, la interacción entre diferentes tipos de suelos o rocas, y evaluar las tensiones y esfuerzos internos. Software comúnmente utilizado para este tipo de análisis incluye programas como **PLAXIS o FLAC**.



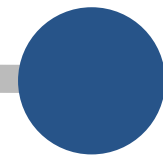
# Métodos Numéricos-Método de elementos finitos

## ¿Cómo Funciona el Método de Elementos Finitos?



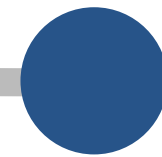
### Discretización del Dominio

El talud se divide en un número finito de elementos pequeños (triángulos o cuadriláteros en 2D, tetraedros o hexaedros en 3D). Estos elementos se conectan en nodos, que son puntos donde se definen las variables desconocidas (desplazamientos, tensiones, etc.).



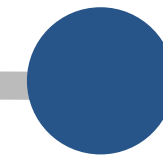
### Formulación de las Ecuaciones

Se establecen ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del material dentro de cada elemento. Estas ecuaciones se basan en las leyes de la mecánica de sólidos y en las propiedades del material.



### Solución de las Ecuaciones

Las ecuaciones se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas, que se resuelve utilizando métodos numéricos como la eliminación de Gauss o métodos iterativos. La solución de este sistema proporciona los valores de las variables desconocidas en cada nodo.

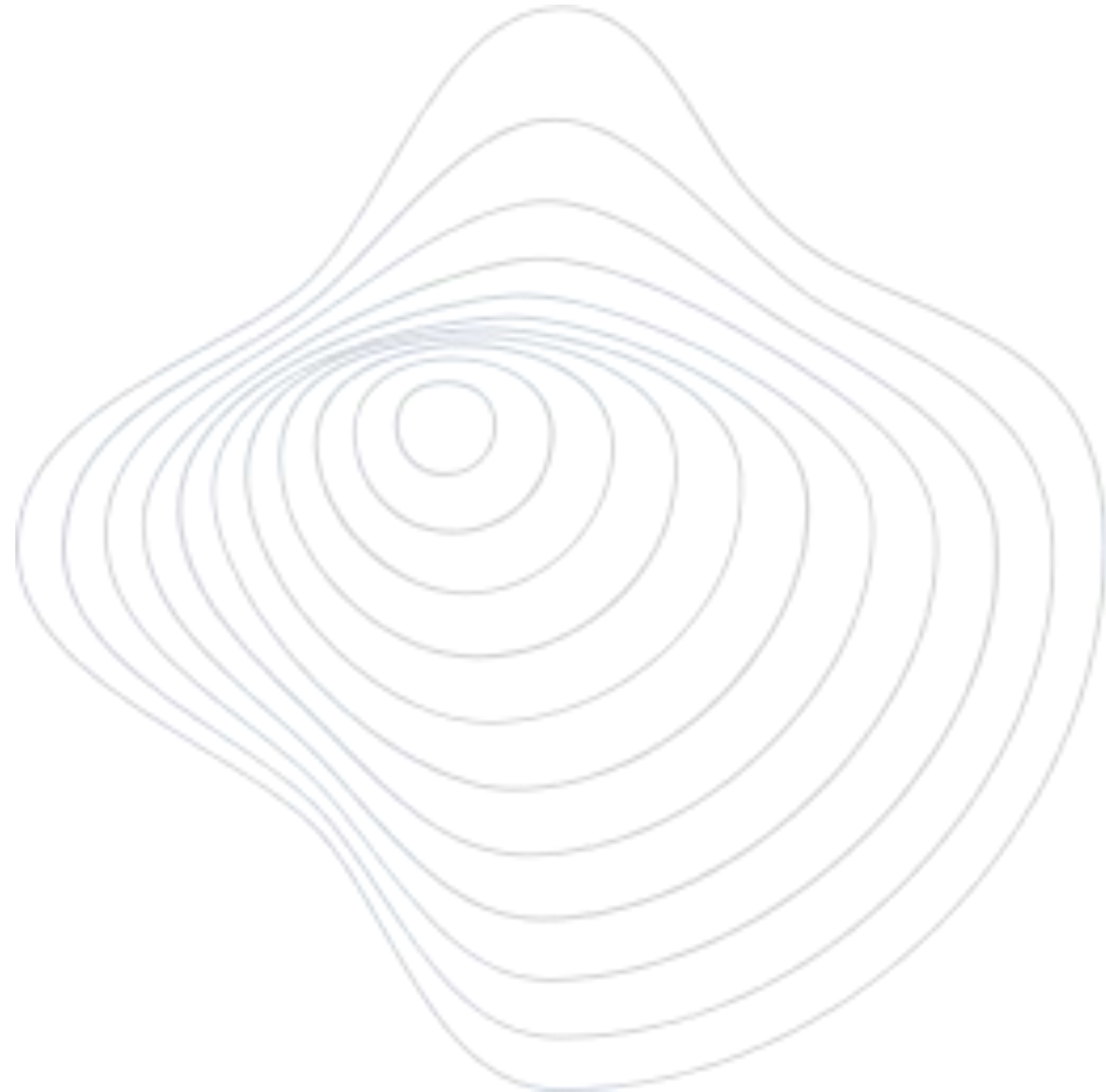


### Postprocesamiento

Los resultados obtenidos se analizan para determinar las tensiones, deformaciones y desplazamientos en cada punto del modelo. Se pueden identificar las zonas de mayor concentración de tensiones y las posibles superficies de falla.

# Métodos Numéricos-Método de elementos finitos

## Ventajas del Método de Elementos Finitos en el Análisis de Taludes



1

### Flexibilidad

Permite modelar geometrías complejas y heterogeneidades del suelo.

2

### Precisión

Proporciona resultados detallados de las tensiones y deformaciones en todo el dominio.

3

### No linealidad

Puede modelar comportamientos no lineales del material, como la plasticidad y la fluencia.

4

### Análisis dinámico

Permite simular el comportamiento del talud bajo cargas dinámicas, como sismos.

# Métodos Numéricos-Método de elementos finitos

1

## **Análisis de estabilidad**

Identificación de la superficie de falla potencial y cálculo del factor de seguridad.

2

## **Evaluación del efecto de las cargas**

Análisis del impacto de cargas externas, como el peso de una estructura o la presión del agua.

3

## **Estudio del comportamiento a largo plazo**

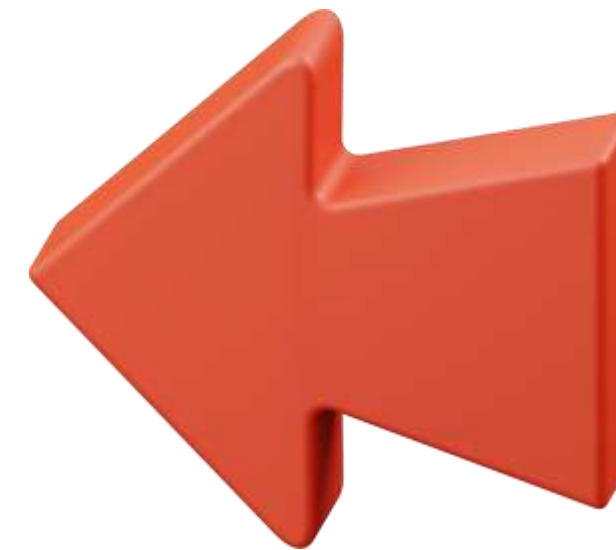
Simulación de procesos como la consolidación y la creep.

4

## **Optimización del diseño**

Evaluación de diferentes alternativas de diseño para mejorar la estabilidad del talud.

## **Aplicaciones del Método de Elementos Finitos en la Estabilidad de Taludes**



# Métodos Numéricos-Método de elementos finitos

## Limitaciones del Método de Elementos Finitos



### Complejidad

Requiere de conocimientos especializados y software sofisticado.



### Tiempo computacional

Los modelos grandes pueden requerir mucho tiempo de cálculo.



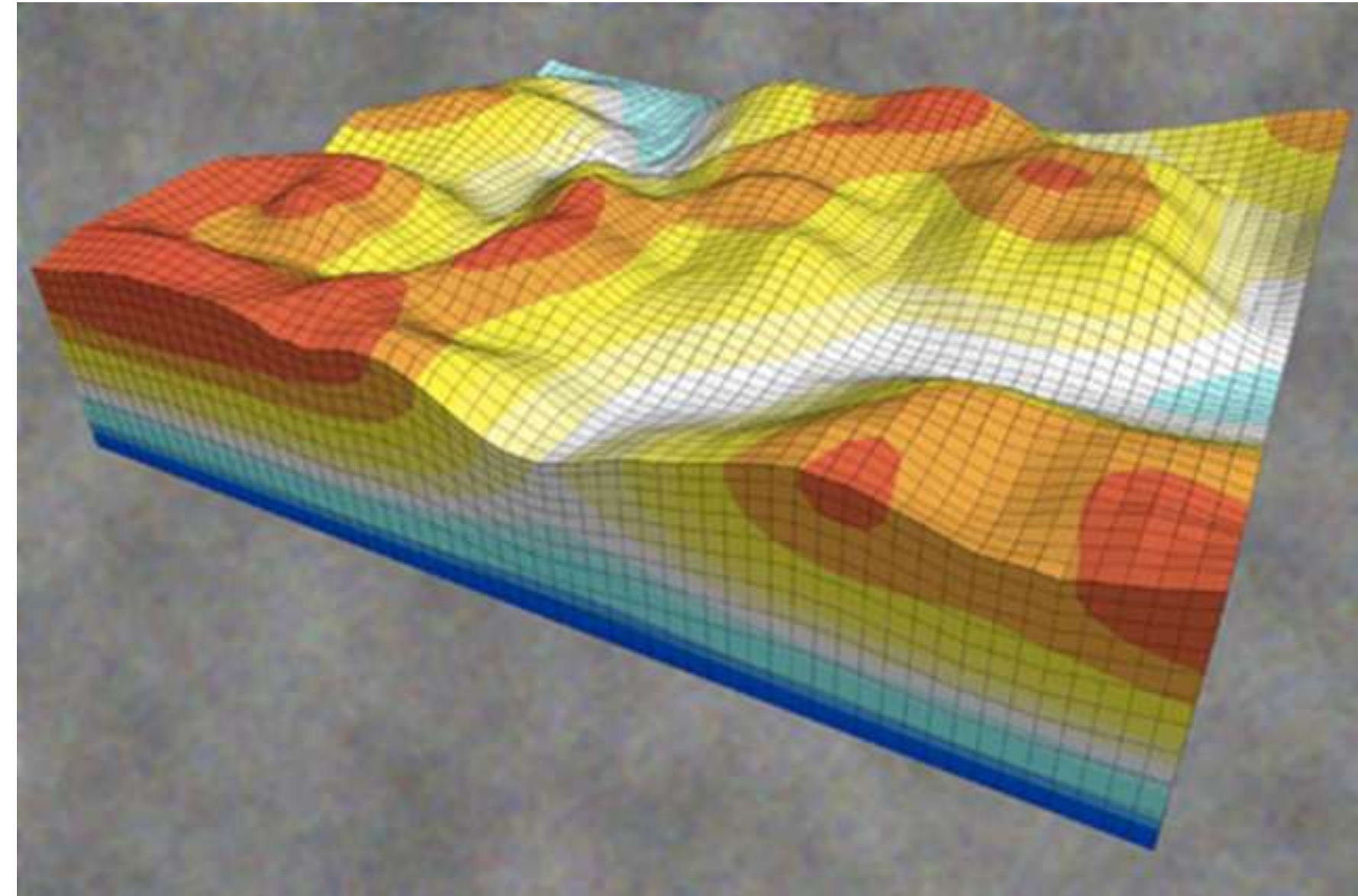
### Dependencia de los parámetros del material

La precisión de los resultados depende de la calidad de los datos de entrada.

# Métodos Numéricos

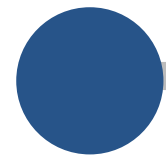
**Método de Diferencias Finitas (FDM):** Similar al FEM, pero en lugar de discretizar el talud en elementos, se discretiza en una malla donde se resuelven ecuaciones diferenciales.

Se utiliza en situaciones donde es necesario modelar el comportamiento del suelo en el tiempo, como en análisis dinámicos o de larga duración.



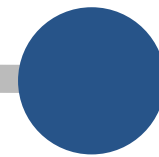
# Métodos Numéricos

¿Cómo  
Funciona?



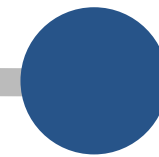
## Discretización del Dominio

El dominio del problema (por ejemplo, un talud) se divide en una malla regular de puntos o nodos.



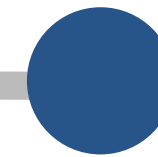
## Aproximación de Derivadas

Las derivadas en las ecuaciones diferenciales se aproximan por diferencias finitas, es decir, se expresan como una combinación lineal de los valores de la función en los nodos vecinos.



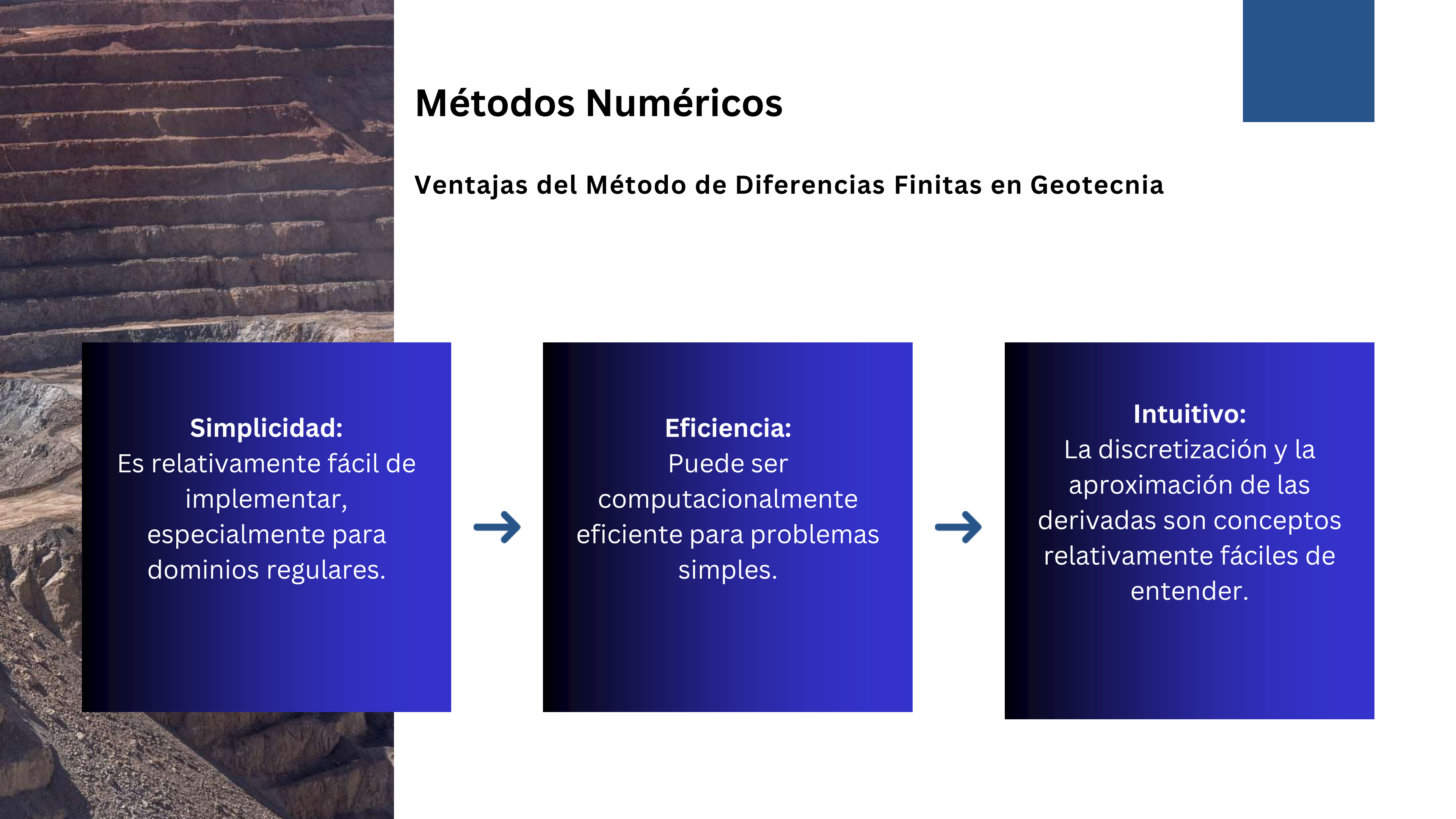
## Sistema de Ecuaciones

Se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que relaciona los valores de la función en cada nodo.



## Solución del Sistema

Este sistema se resuelve numéricamente para obtener los valores de la función en todos los nodos de la malla.



# Métodos Numéricos

## Ventajas del Método de Diferencias Finitas en Geotecnia

### **Simplicidad:**

Es relativamente fácil de implementar, especialmente para dominios regulares.



### **Eficiencia:**

Puede ser computacionalmente eficiente para problemas simples.



### **Intuitivo:**

La discretización y la aproximación de las derivadas son conceptos relativamente fáciles de entender.



# Métodos Numéricos

## Limitaciones del Método de Diferencias Finitas

### **Dominios Regulares:**

Funciona mejor en dominios con geometrías simples. Para geometrías complejas, puede ser necesario utilizar técnicas de transformación de coordenadas o elementos finitos.



### **Condiciones de Frontera:**

El tratamiento de las condiciones de frontera puede ser complicado, especialmente para condiciones de frontera no homogéneas.



### **Precisión:**

La precisión de los resultados depende de la finura de la malla y del orden de la aproximación de las derivadas.

# Métodos Numéricos

## Aplicaciones en Geotecnia

### Flujo en Medios Porosos

Análisis de la distribución de la presión de poros en suelos saturados.

### Estabilidad de Taludes

Evaluación de la estabilidad de taludes bajo diferentes condiciones de carga.



### Consolidación

Estudio del proceso de asentamiento de suelos arcillosos.

### Termo-hidráulica

Análisis de problemas acoplados de flujo de calor y agua en suelos.

# Métodos Numéricos

## ¿Cuándo Utilizar el Método de Diferencias Finitas?

El método de diferencias finitas es una buena opción para problemas con geometrías simples y condiciones de frontera sencillas. También es útil para obtener una primera aproximación a la solución de un problema más complejo antes de utilizar un método más sofisticado como el método de elementos finitos.

| Característica     | Método de Diferencias Finitas | Método de Elementos Finitos      |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Discretización     | Malla regular                 | Malla irregular                  |
| Geometría          | Dominios simples              | Dominios complejos               |
| Funciones de forma | Polinomios simples            | Funciones de forma más complejas |
| Flexibilidad       | Menos flexible                | Más flexible                     |

# Métodos Numéricos

\*

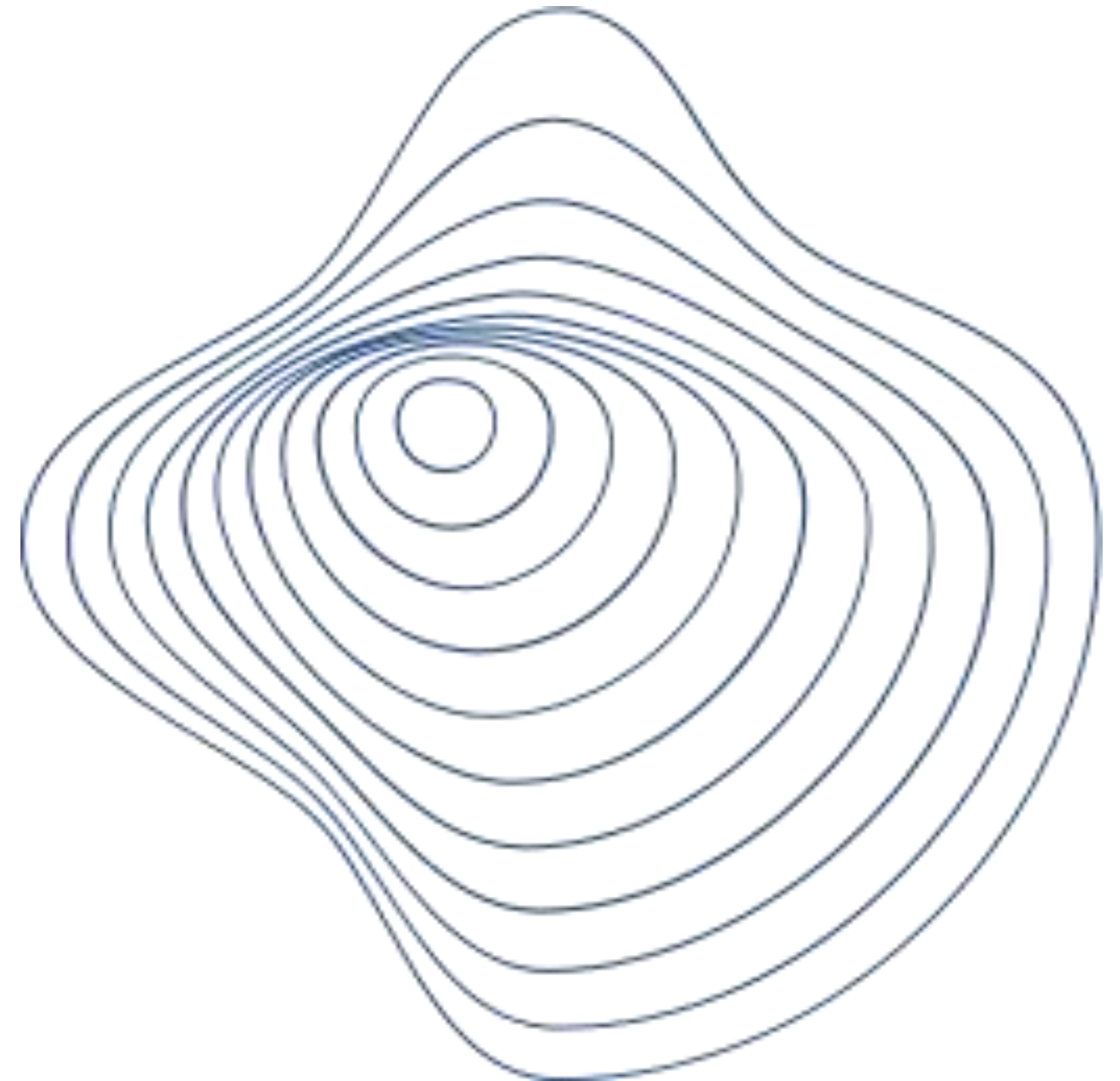
## Método de Elementos Distintos (DEM):

Se utiliza en casos donde el talud está compuesto de bloques discretos, como en macizos rocosos fracturados. Este método permite modelar el movimiento y la interacción entre estos bloques, evaluando la estabilidad de sistemas rocosos con múltiples discontinuidades.

\*

## Métodos de Red de Tensión

Se utilizan principalmente para modelar problemas de deformación plástica y flujo en suelos y rocas, donde los métodos tradicionales pueden no ser efectivos. Este método tiene la capacidad de modelar tanto grandes desplazamientos como la apertura de grietas en el material del talud.



# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

En el campo de la geotecnia y la evaluación de la estabilidad de taludes, los softwares especializados desempeñan un papel fundamental.

Estas herramientas permiten aplicar diversos métodos analíticos y numéricos para modelar el comportamiento de suelos y rocas. Tres programas ampliamente utilizados en este contexto son SLIDE, FLAC y FLAC3D.

Gracias a estos avances tecnológicos, ahora es posible evaluar la estabilidad de taludes considerando diferentes condiciones de carga.



<https://www.rocscience.com/>



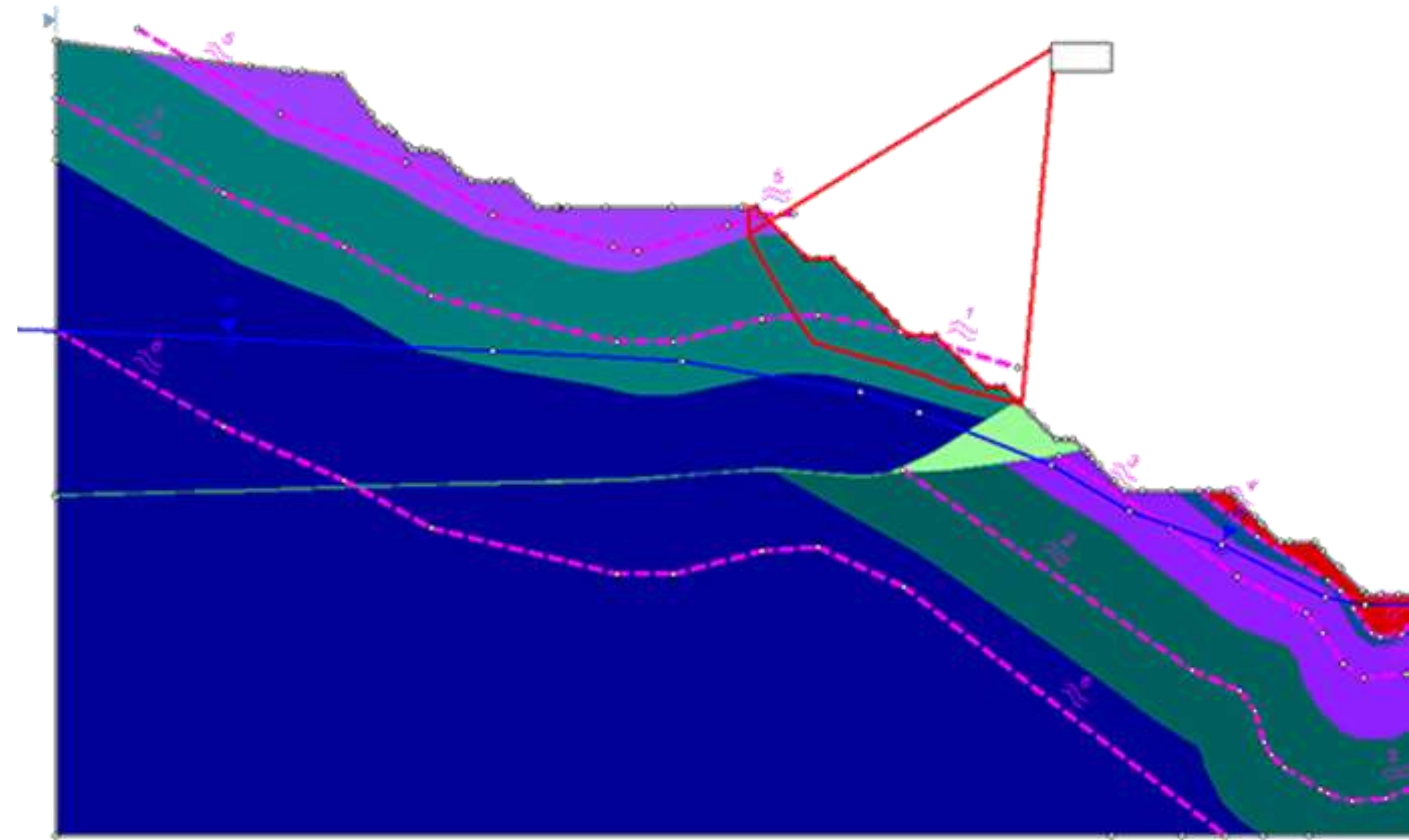
<https://www.itasca.cl/>

# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 1. SLIDE (Rocscience)

SLIDE es un software basado en el Método del Equilibrio Límite (LEM) y está diseñado para realizar análisis de estabilidad de taludes en 2D.

Es una herramienta popular en proyectos de ingeniería geotécnica debido a su simplicidad y versatilidad.

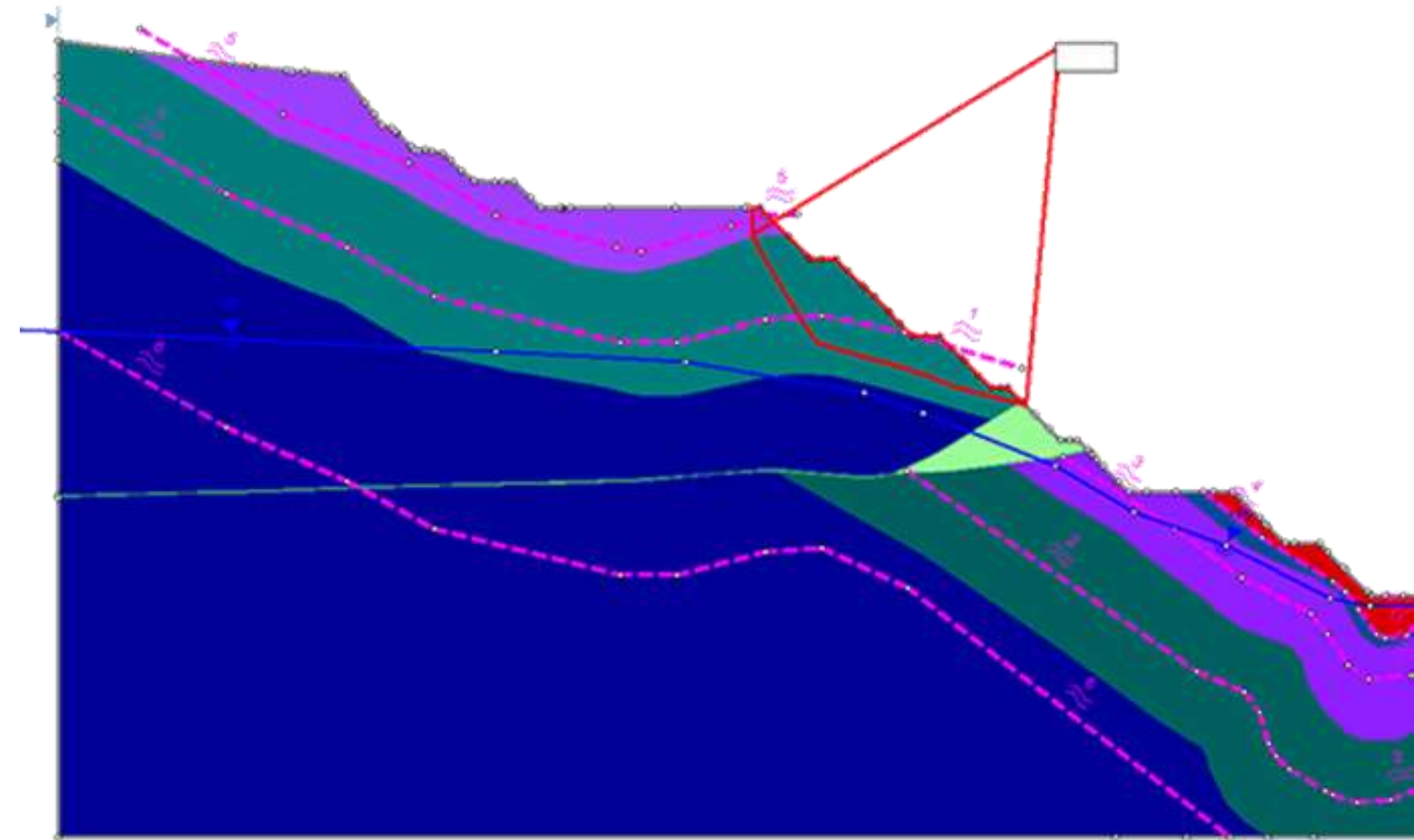


# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 1. SLIDE (Rocscience)

### Funciones principales:

- Evaluación de taludes en suelos, rocas y mezclas de ambos.
- Modelado de superficies de falla circulares y no circulares
- Análisis bajo diferentes condiciones de carga, como fuerzas sísmicas o cargas aplicadas.
- Incorporación de agua subterránea en el análisis mediante la modelación de presiones de poro.
- Módulo de análisis probabilístico que permite realizar estudios de incertidumbre en las propiedades del material.

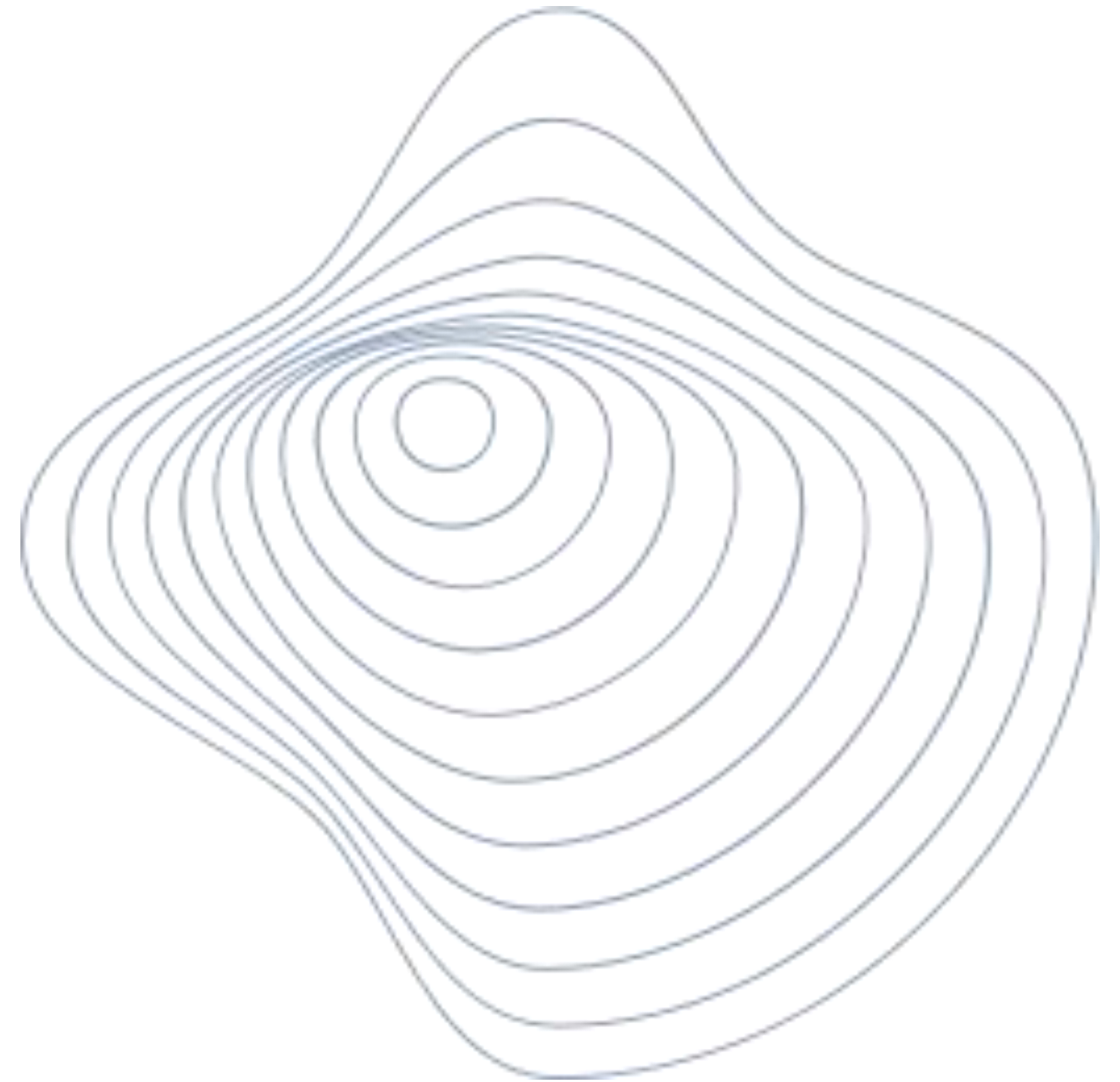


**Aplicación típica:** Proyectos de estabilidad en taludes naturales y taludes de excavación, donde se requiere un análisis rápido y robusto de diferentes escenarios de falla.

# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 2. FLAC y FLAC3D (ITASCA)

FLAC y FLAC3D son programas de diferencias finitas y elementos finitos respectivamente, desarrollados por Itasca Consulting Group. Estos programas permiten realizar análisis más detallados de la deformación y el fallo de medios continuos como suelos y rocas.

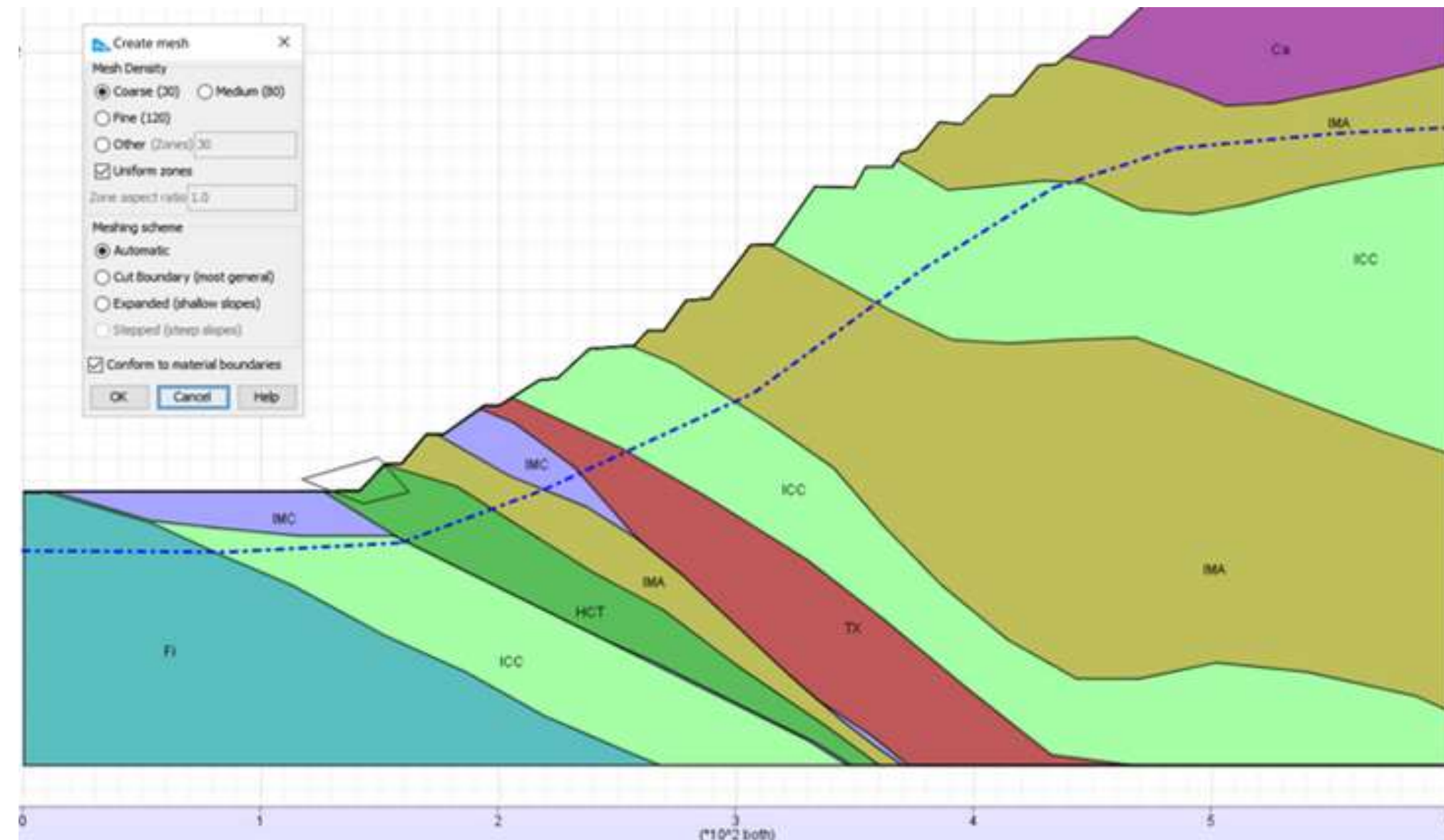


# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 2.1. FLAC

**FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)** es un software que utiliza el **Método de Diferencias Finitas (FDM)** para modelar el comportamiento de suelos y rocas.

A diferencia de SLIDE, **FLAC** es más adecuado para análisis detallados y complejos, como el modelado de deformaciones y la evolución del comportamiento del terreno en el tiempo.

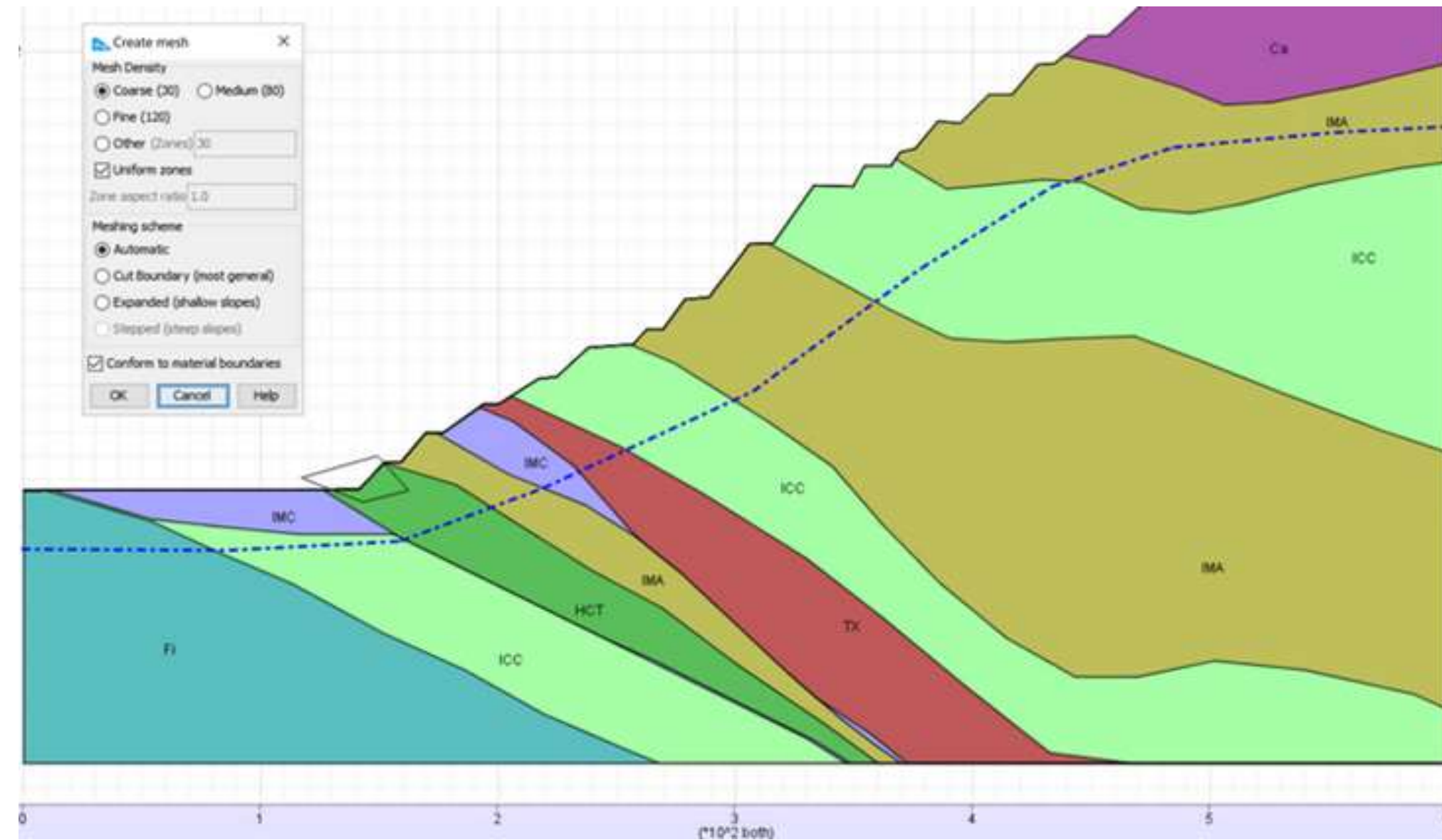


# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 2.1. FLAC

### Funciones principales:

- Modelado bidimensional (2D) de problemas geotécnicos bajo condiciones estáticas y dinámicas.
- Análisis de deformaciones y tensiones en taludes, excavaciones subterráneas, presas y cimentaciones.
- Capacidad de simular el comportamiento no lineal de los materiales, como la plasticidad y la fractura del terreno.
- Simulación de problemas de interacción suelo-estructura.



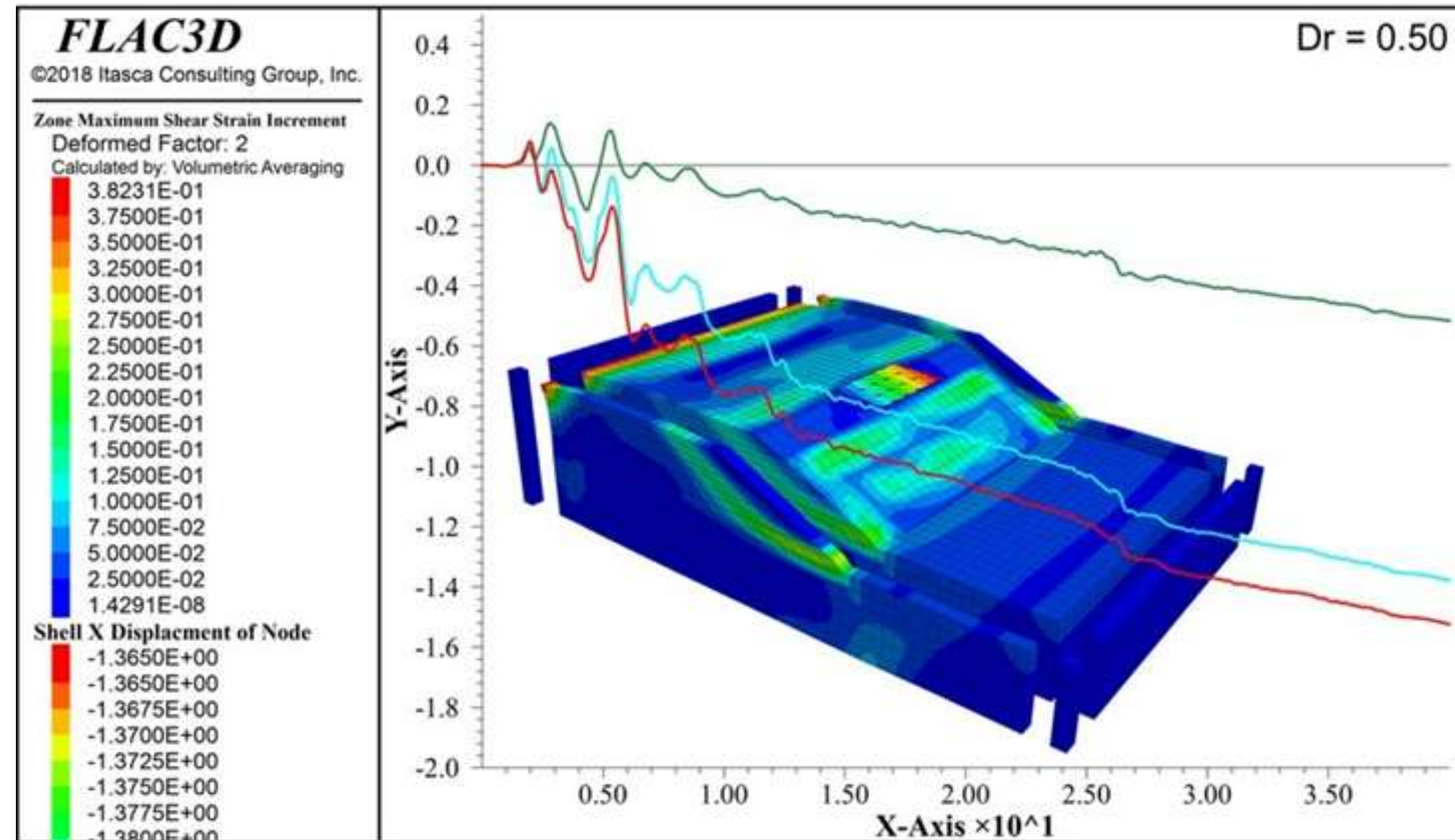
**Aplicación típica:** proyectos complejos donde se requiere evaluar la respuesta del terreno a cambios en las condiciones de carga o excavación, como taludes con geometrías irregulares y condiciones variables.

# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 2.2. FLAC3D

**FLAC3D** es la versión en 3D de FLAC y está diseñada para realizar análisis tridimensionales de estabilidad en suelos y rocas.

Permite modelar escenarios complejos donde las condiciones espaciales y las interacciones son difíciles de representar en 2D.

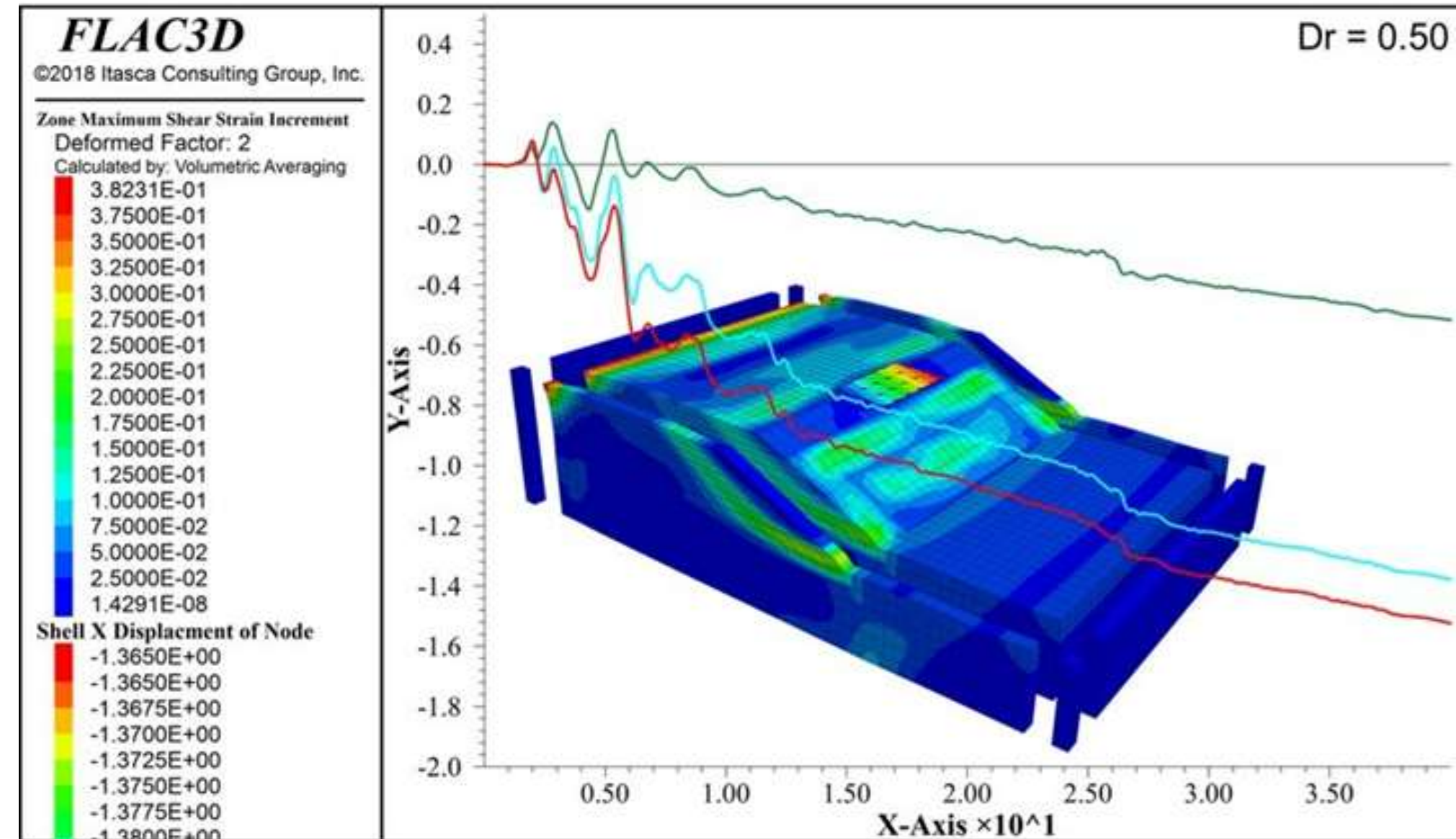


# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

## 2.2. FLAC3D

### Funciones principales:

- Modelado tridimensional de macizos rocosos y suelos, ideal para proyectos de gran escala.
- Simulación de grandes deformaciones y análisis de colapso en taludes, excavaciones subterráneas, cimentaciones, entre otros.
- Capacidad para modelar discontinuidades, fracturas y contactos entre diferentes materiales.
- Incluye análisis dinámicos, ideales para evaluar la estabilidad ante sismos.



# Software de análisis geotécnico: SLIDE, FLAC, FLAC3D

| Software      | Aplicación Típica                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SLIDE</b>  | Proyectos de estabilidad en taludes naturales y taludes de excavación, donde se requiere un análisis rápido y robusto de diferentes escenarios de falla.                                                                                                             |
| <b>FLAC</b>   | Se utiliza en proyectos más complejos donde se requiere evaluar la respuesta del terreno a cambios en las condiciones de carga o excavación, como en túneles, presas o taludes con geometrías irregulares y condiciones variables.                                   |
| <b>FLAC3D</b> | Es preferido en casos donde la geometría del talud o de la excavación es compleja y requiere un análisis detallado en tres dimensiones, como en minas subterráneas, taludes de gran tamaño o proyectos de infraestructura con interacción suelo-estructura compleja. |

| Software      | Método                             | Dimensiones | Usos Principales                                                | Complejidad |
|---------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SLIDE</b>  | Método del equilibrio límite (LEM) | 2D          | Estabilidad de taludes en suelos y rocas, análisis preliminares | Baja-Media  |
| <b>FLAC</b>   | Diferencias Finitas (FDM)          | 2D          | Análisis de deformaciones y tensiones en taludes y excavaciones | Media-Alta  |
| <b>FLAC3D</b> | Elementos Finitos                  | 3D          | Análisis detallados en proyectos geotécnicos complejos          | Alta        |

# Software de análisis geotécnico

## Otras Herramientas

Además de SLIDE, FLAC y FLAC3D, existen otras herramientas populares para el análisis de estabilidad de taludes, como:

1

### **GEO5 (FINE)**

Ofrece una amplia gama de módulos para el análisis geotécnico, incluyendo la estabilidad de taludes.

2

### **Plaxis (Bentley)**

Software de elementos finitos especializado en geotecnia, que permite analizar problemas de estabilidad de taludes, túneles y cimentaciones.

3

### **Seep/W (Seequent)**

Programa para el análisis de flujo en medios porosos, que puede utilizarse en combinación con otros softwares para evaluar la estabilidad de taludes en condiciones saturadas.





# Software de análisis geotécnico

## ¿Qué Software Elegir?

La elección del software adecuado dependerá de varios factores, como:

### 01 Complejidad del problema

Para problemas simples, SLIDE puede ser suficiente. Para problemas más complejos, como la interacción suelo-estructura, FLAC o FLAC3D pueden ser más adecuados.

### 03 Disponibilidad de datos

La calidad y cantidad de datos disponibles influirán en la elección del modelo numérico.

### 02 Experiencia del usuario

La facilidad de uso y la interfaz gráfica del software también son factores importantes para considerar.

# Factor de seguridad

El Factor de Seguridad (FS) en la estabilidad de taludes es un parámetro adimensional que evalúa cuán estable es un talud, comparando las fuerzas o momentos que tienden a causar el deslizamiento (fuerzas actuantes) con aquellas que tienden a resistirlo (fuerzas resistentes).



Matemáticamente, el **FS** se define como:

$$FS = \frac{\textit{Resistencia al deslizamiento}}{\textit{Resistencia al corte}}$$

\*

## Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad del material del talud para resistir fuerzas que tienden a hacer que se deslice. Depende de propiedades como la cohesión y el ángulo de fricción interna del material.

\*

## Resistencia al corte

Es la fuerza necesaria para iniciar un movimiento de deslizamiento a lo largo de una superficie potencial de falla.

# Factor de seguridad

## Interpretación del FS

### **FS > 1**

El talud es estable. Las fuerzas resistentes son mayores que las fuerzas actuantes.

### **FS = 1**

El talud está en equilibrio límite. Las fuerzas actuantes son iguales a las fuerzas resistentes, lo que implica que cualquier perturbación podría causar un deslizamiento.

### **FS < 1**

El talud es inestable. Las fuerzas actuantes superan las fuerzas resistentes, lo que indica un deslizamiento inminente o ya en proceso.



## Factores que afectan el FS

### **Propiedades del suelo o roca**

(resistencia al corte, cohesión, ángulo de fricción).

### **Geometría del talud**

(altura, ángulo de inclinación).

### **Condiciones de agua**

(nivel freático, presión de poros).

### **Carga externa**

(vibraciones, peso adicional).



# Preguntas



Contacto

Teléfono: +569 6406 6491

Whatsapp: +569 6406 6491

Email: [contacto@ore-mining.com](mailto:contacto@ore-mining.com)

Web: [www.oremining.cl](http://www.oremining.cl)