



Universidad
Politécnica
de Cartagena

JORNADA SOBRE
ESTABILIDAD DE TALUDES
Y SU IMPORTANCIA
EN LA RESTAURACIÓN
DE EXPLOTACIONES MINERAS



G CONSELLERIA
O TRANSICIÓ ENERGÈTICA
I SECTORS PRODUCTIUS
B DIRECCIÓ GENERAL
/ POLÍTICA INDUSTRIAL

**“Estabilidad de taludes en la práctica: conceptos básicos
y aplicación de los métodos de diseño y evaluación de la estabilidad”**

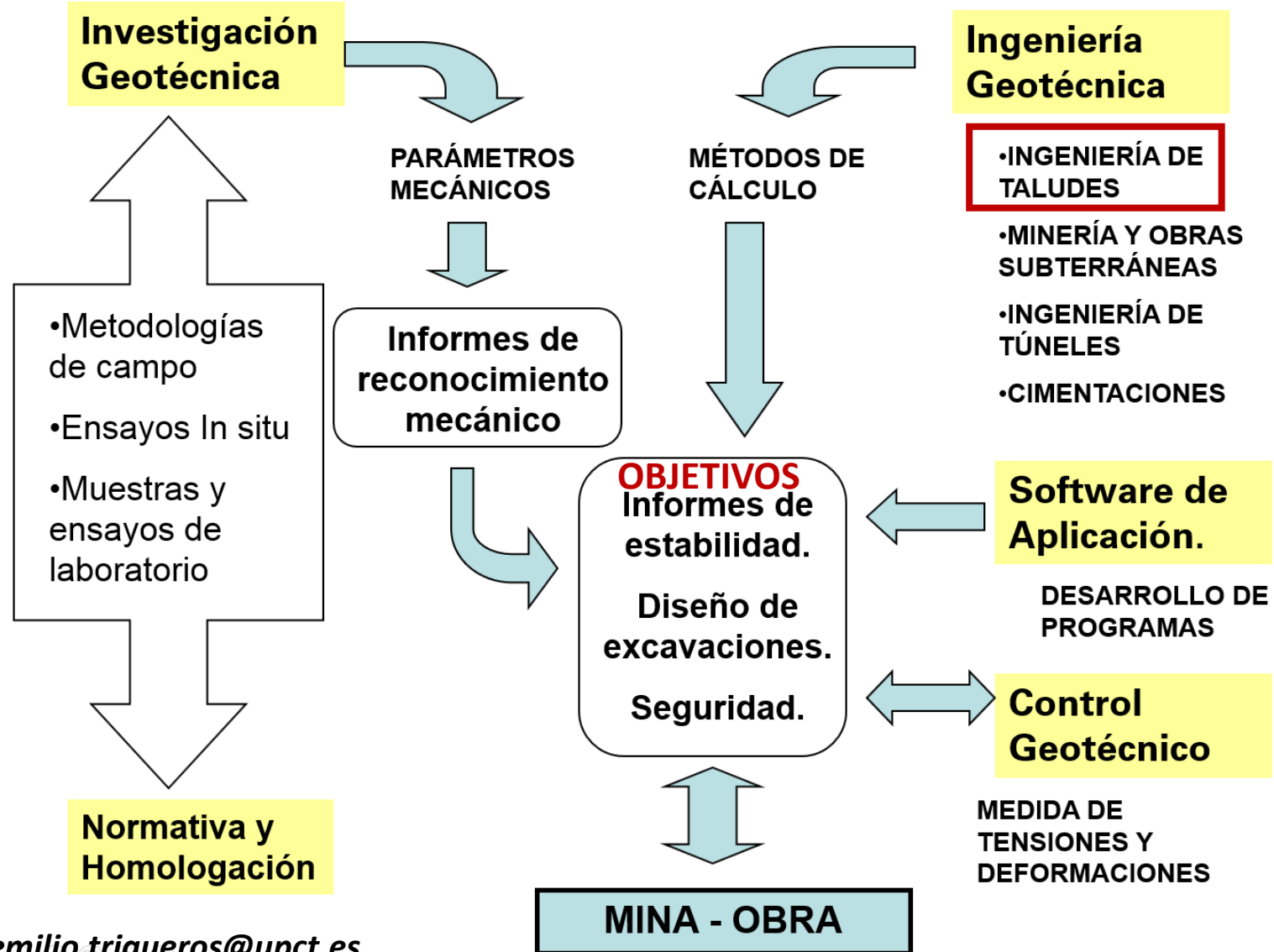
Lekoitz (Vizcaya)

Sta. Cruz (Murcia)

28 enero de 2020

Emilio Trigueros Tornero. Departamento de Ingeniería Minera y Civil.

Trabajos y Procesos Geotécnicos



emilio.trigueros@upct.es



Mecanismos Básicos de Rotura

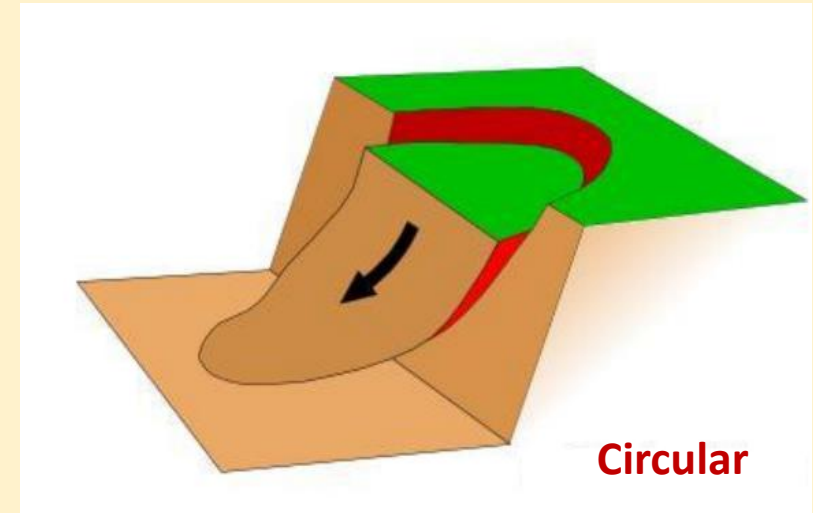
ROCA DURA



Ponce (Murcia)

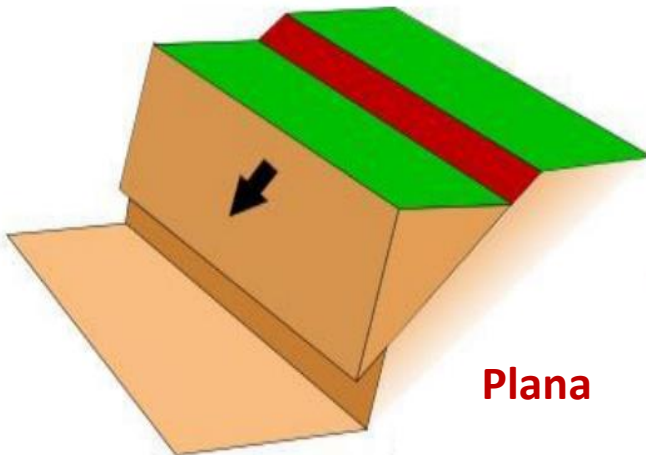
Masiva

ROCA BLANDA O TERRAPLEN

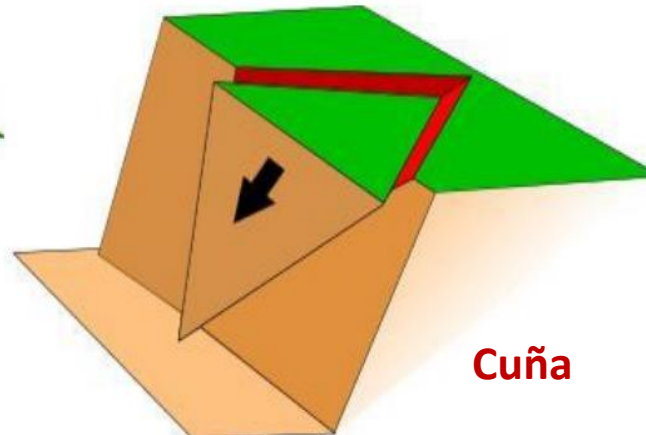


Circular

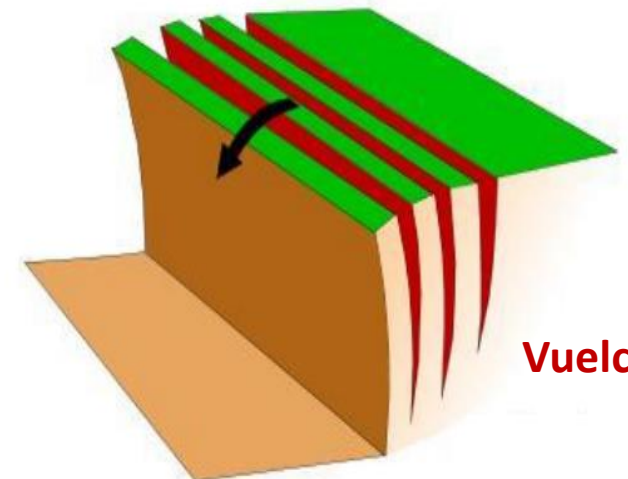
ROCA DURA DIACLASADA



Plana



Cuña

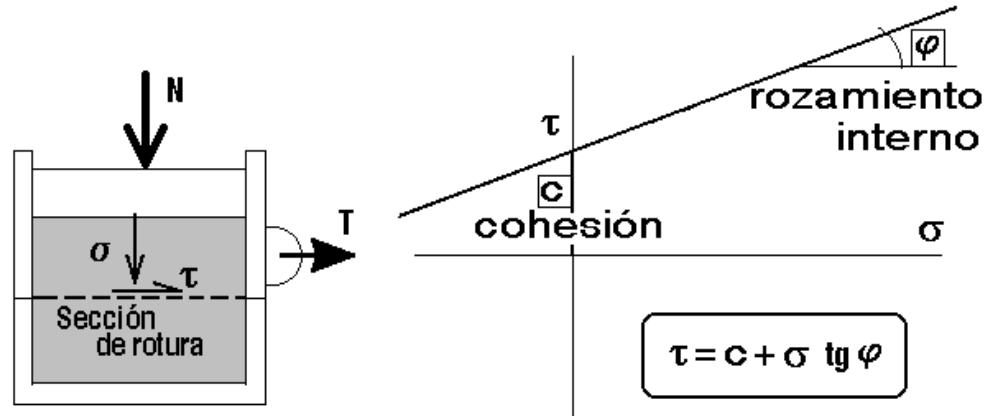


Vuelco

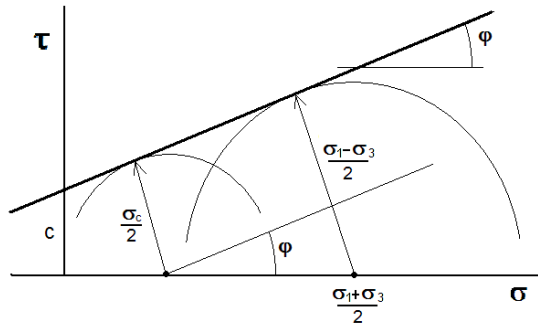


ROCA BLANDA O TERRAPLEN

CRITERIO DE MOHR-COULOMB



Ensayos de Corte Directo o Triaxial



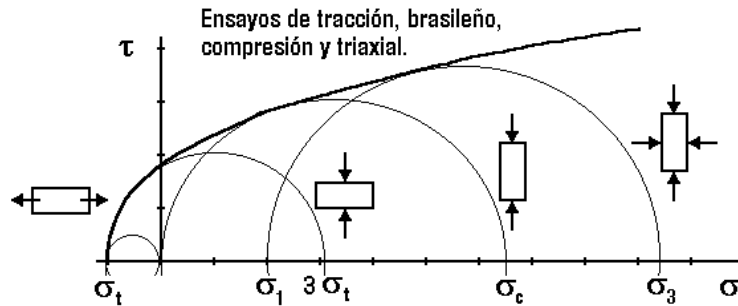
Necesario:

- Obtención de la **cohesión** y la **fricción**.
- Nivel de **saturación** del terreno a través de las redes de drenaje.



ROCA DURA (intacta)

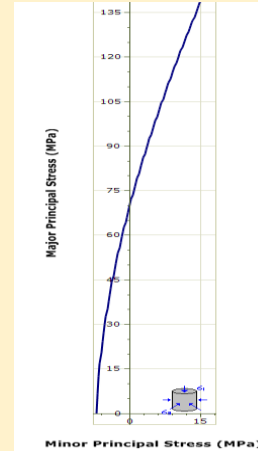
Envolvente de rotura para **LA ROCA**



Válido para roturas de la roca intacta.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5}$$

Ensayos de Compresión, Brasileño y Triaxial



Necesario:

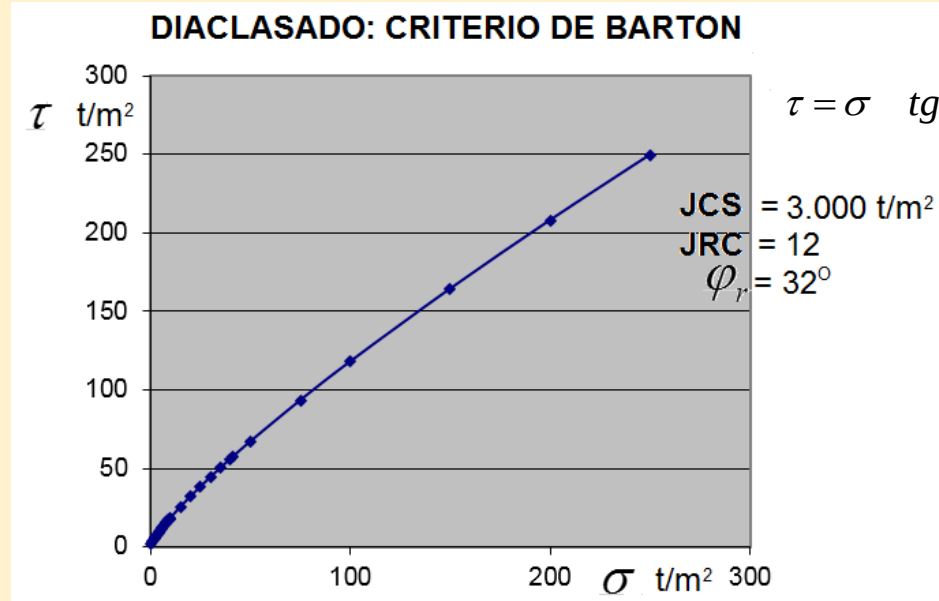
- Obtención de la **resistencia a compresión σ_{ci}** .
- Obtención del **parámetro de ajuste m_i** .
- **Módulos Elásticos E y ν** .





Resistencia a la Rotura

ROCA DURA DIACLASADA



Cabezo Gordo (Murcia)



Inspección de Campo: brújula tectónica y martillo Schmidt.



Necesario:

- Obtención de la ORIENTACIÓN, BUZAMIENTO Y EXTENSIÓN.
- Obtención de Los valores de RUGOSIDAD JRC, RESISTENCIA JCS y FRICCIÓN RESIDUAL φ_r .



MACIZO DE ROCA



Rock Type:

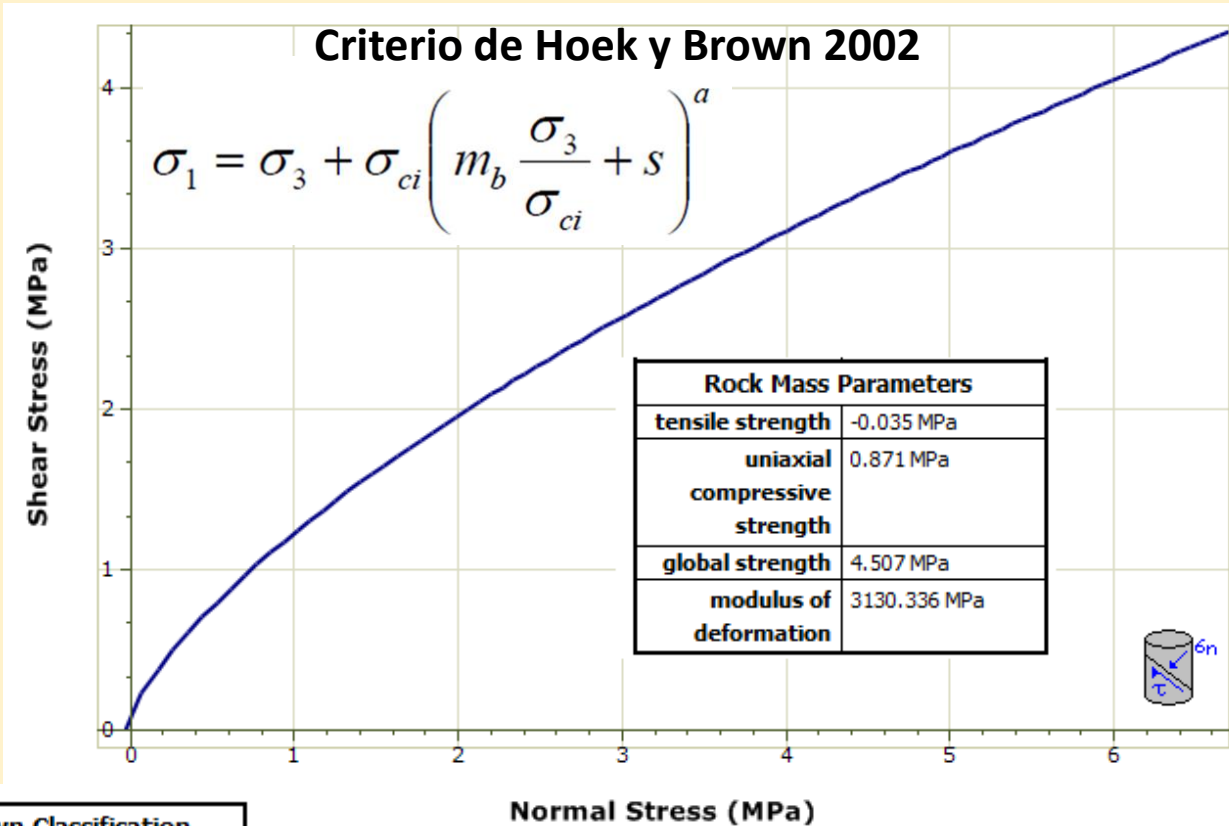
GSI Selection:

STRUCTURE	
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass made up of cubical blocks formed by three sets of intersecting joints
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass, multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets
	BLOCKY, DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting joint sets. Persistence of bedding planes or schistosity
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces

DECREASING INTERLOCKING

DECREASING SURFACE QUALITY

SURFACE CONDITIONS				
VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
80	70	60	50	40
70	60	50	40	30
60	50	40	30	20
50	40	30	20	10



Hoek Brown Classification	
intact uniaxial compressive strength	50 MPa
GSI	45
mi	10
disturbance factor	0.7
intact modulus	40000 MPa

Hoek Brown Criterion	
mb	0.487
s	3.453e-004
a	0.508

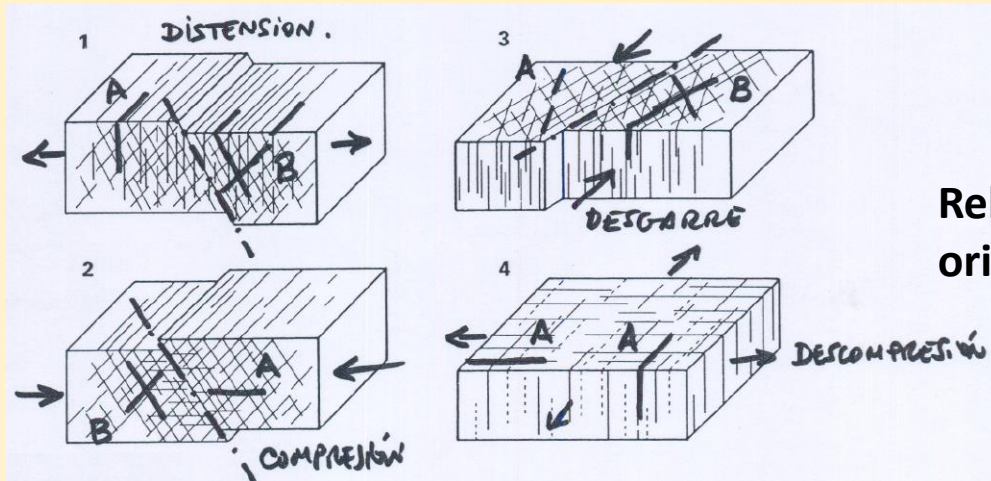
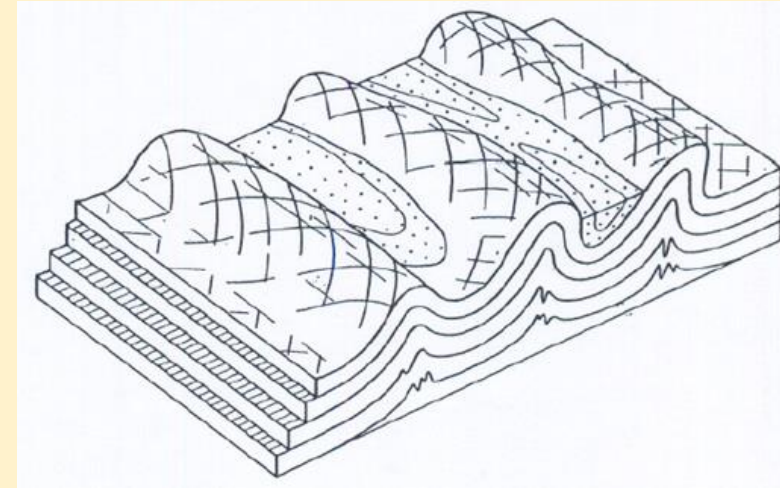
Penaliza la capacidad mecánica de la roca intacta (GSI=100), según densidad de fracturas y estado de las juntas.



Dionysos (Grecia)



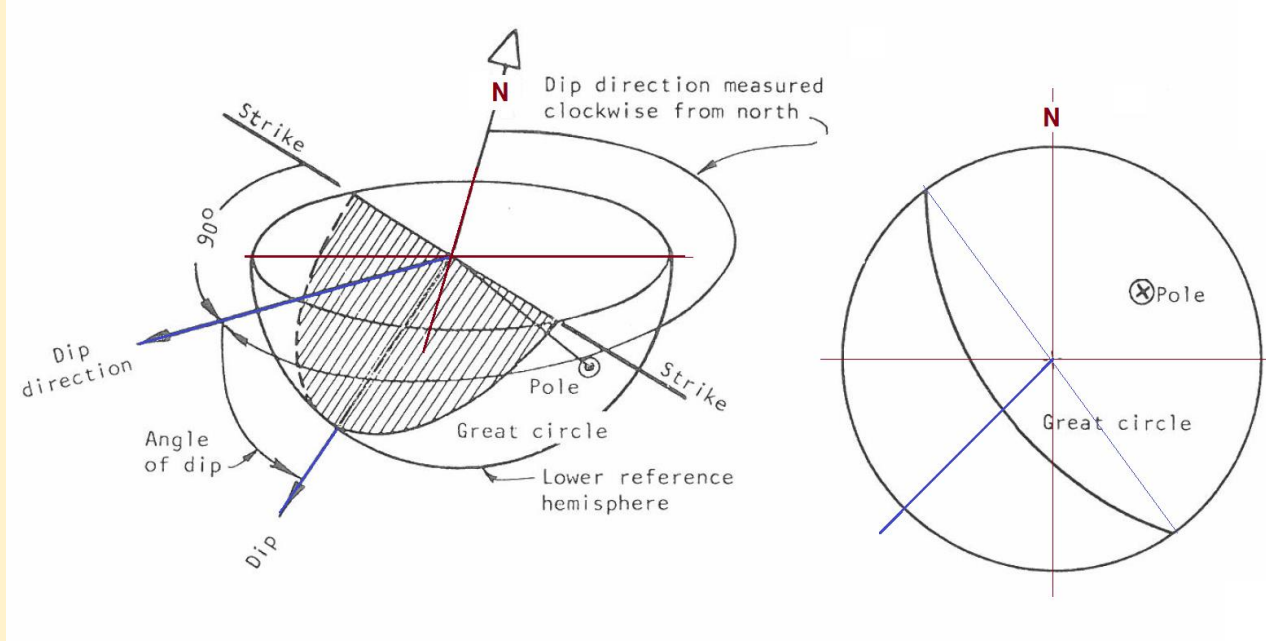
ESTILO TECTÓNICO REGIONAL



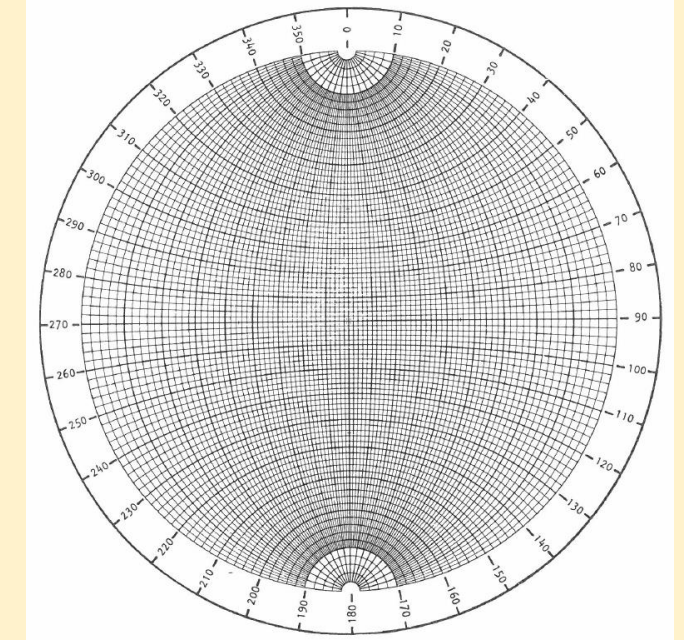
Relación entre las grandes fracturas y las orientaciones del diaclasado



MAPAS DE DENSIDAD DE POLOS



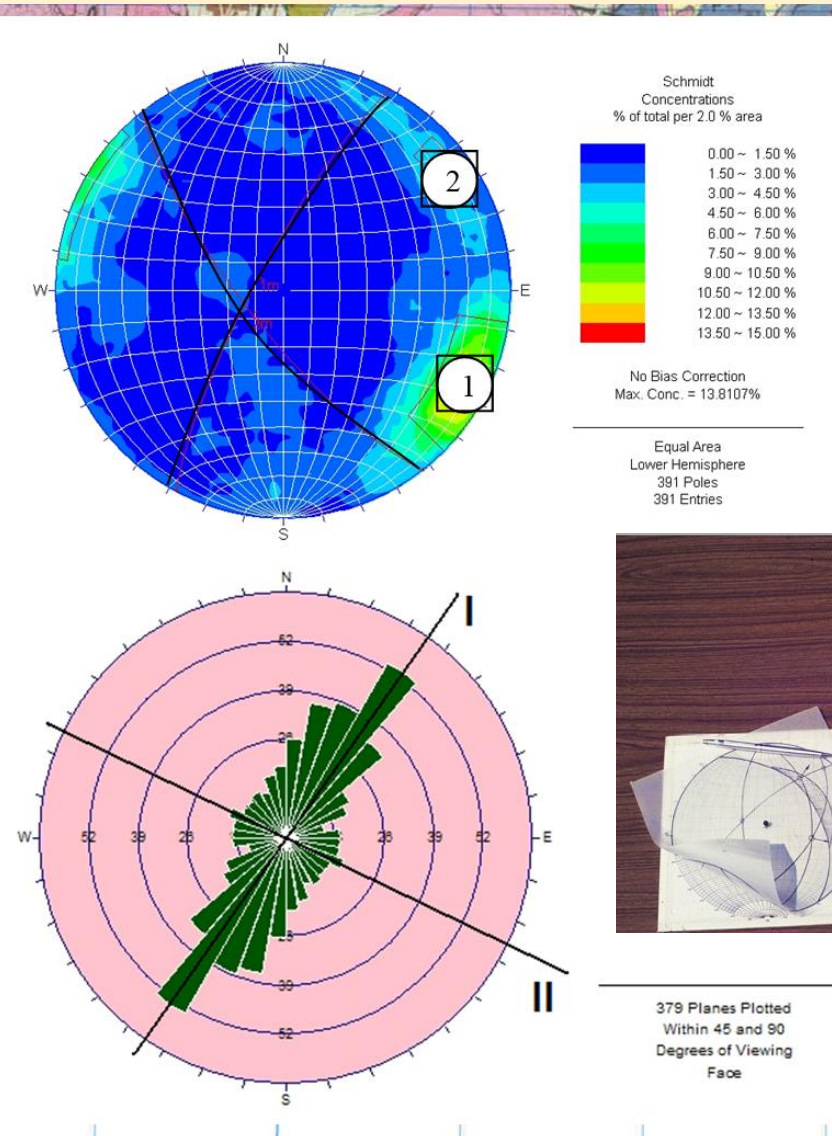
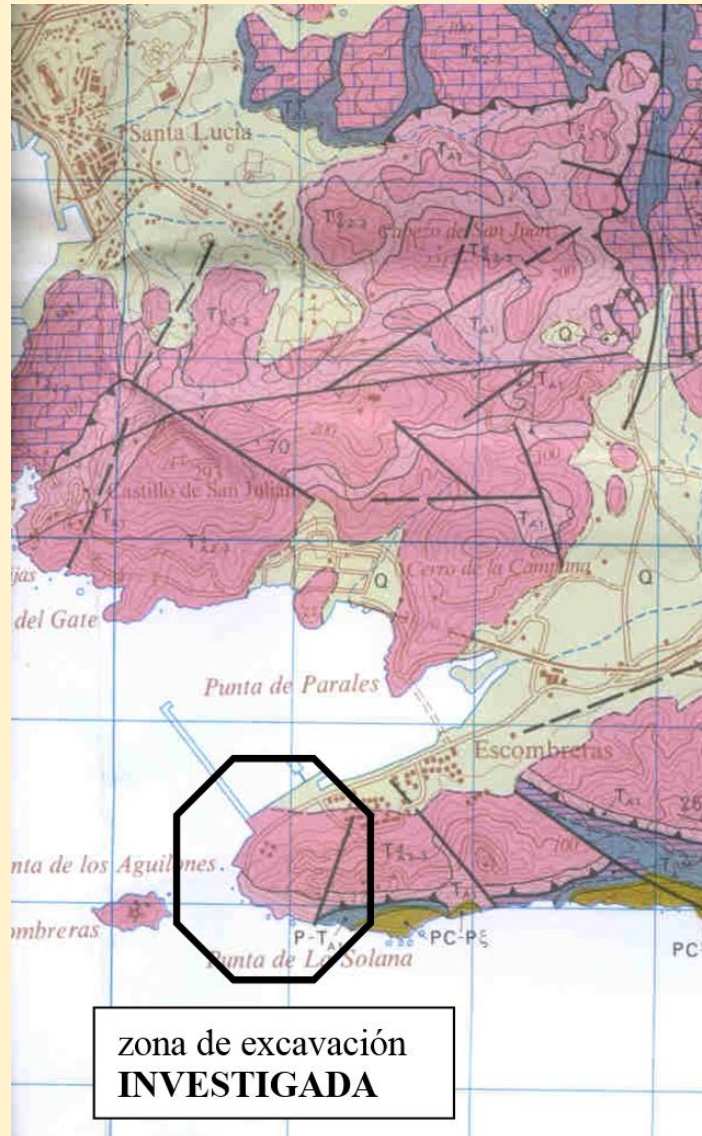
Para cada superficie inspeccionada tomamos el ángulo del buzamiento y la dirección de este (orientación topográfica de la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente).



Se utiliza la proyección estereográfica, facilitada por la plantilla de representación de Schmidt.



MAPAS DE DENSIDAD DE POLOS



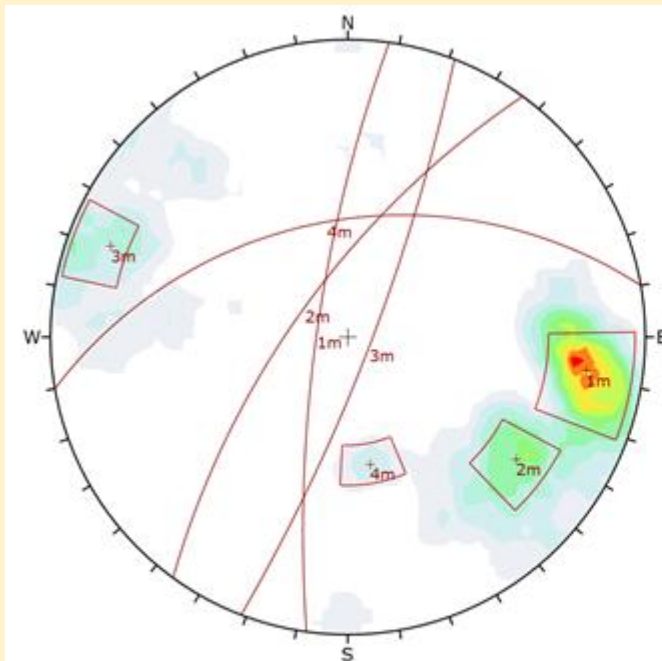


Métodos de análisis de Roturas de Banco

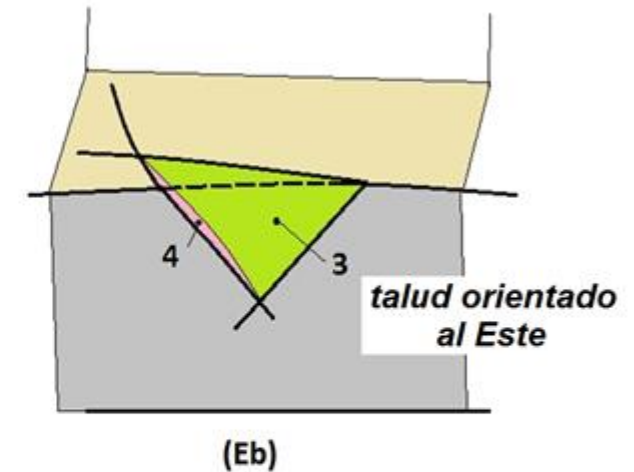
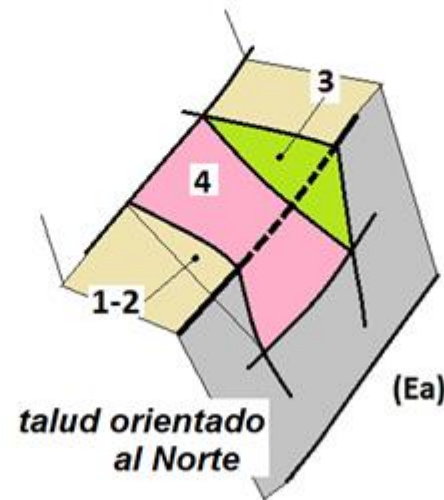
Bloques diagramas

Según la **orientación de los frentes de excavación**, el diaclasado puede configurar bloques cuya estabilidad habrá que evaluar.

Los BLOQUES DIAGRAMA se pueden confeccionar a partir de la representación estereográfica.



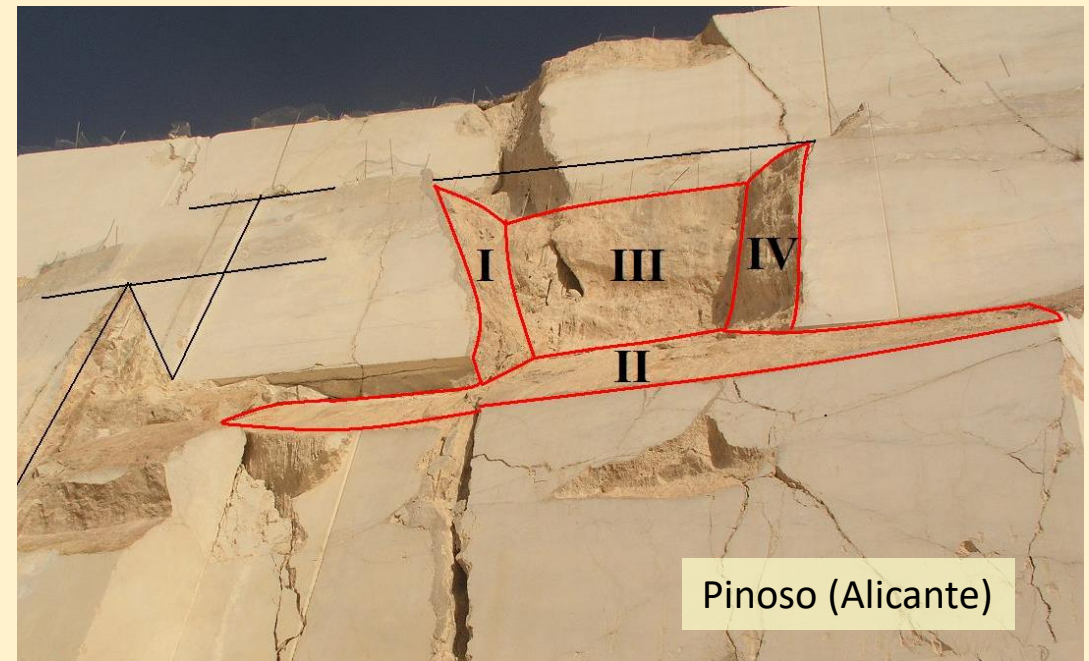
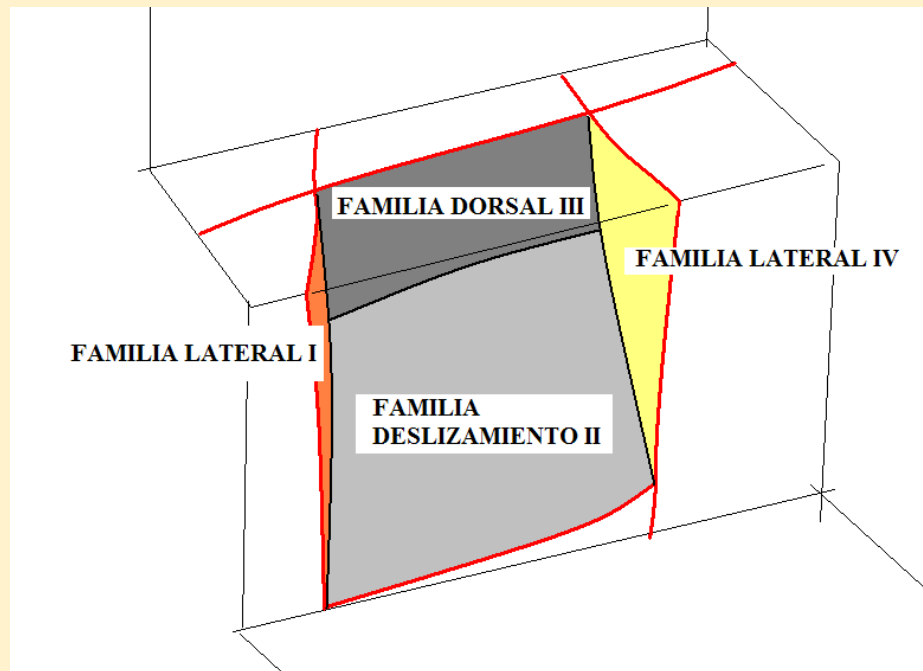
INTERFERENCIAS Diaclasas - Taludes excavación





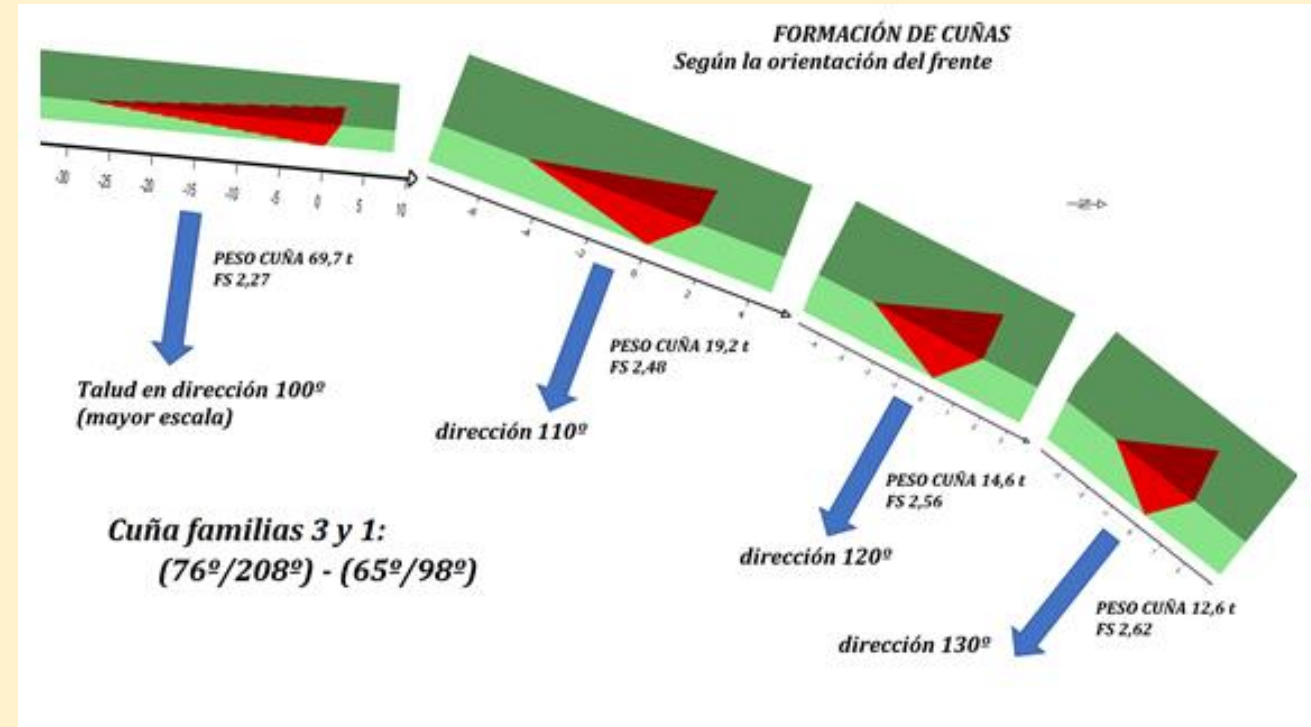
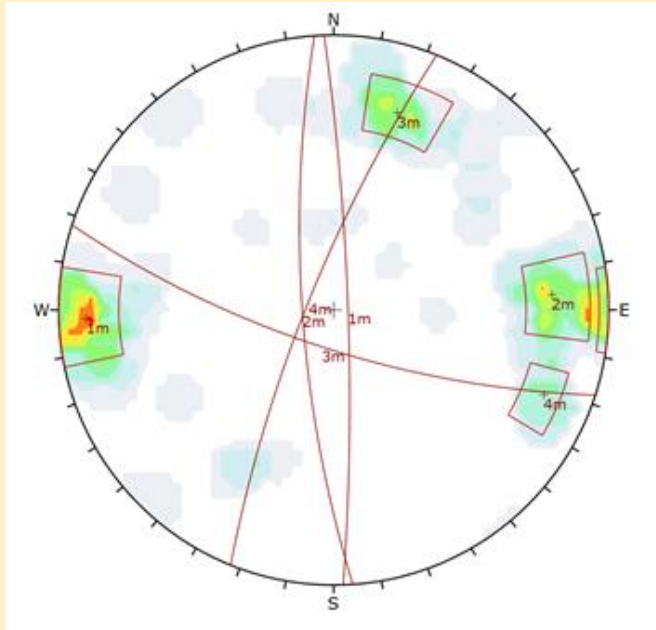
Bloques diagramas

Una vez conseguidos los bloques diagrama en los taludes de la explotación deberá encontrarse **indicios de su existencia** si la cantera está suficientemente desarrollada (al menos 3 bancos).





Bloques diagramas y “software”



Los propios programas de análisis nos permiten disponer del bloque diagrama cambiando la orientación de talud. En este caso **el de cuñas**.



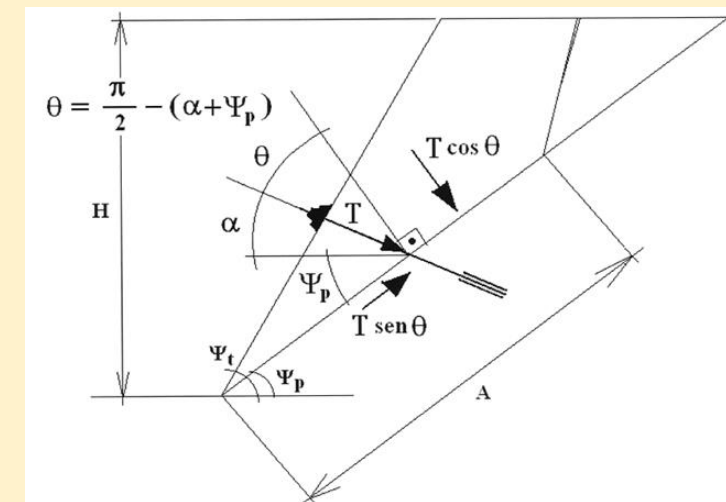
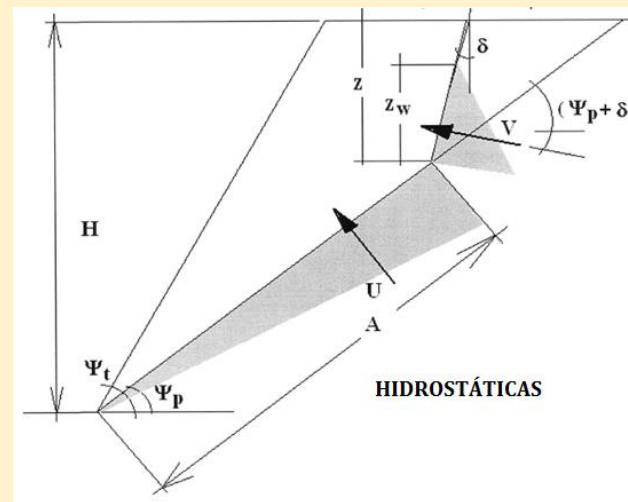
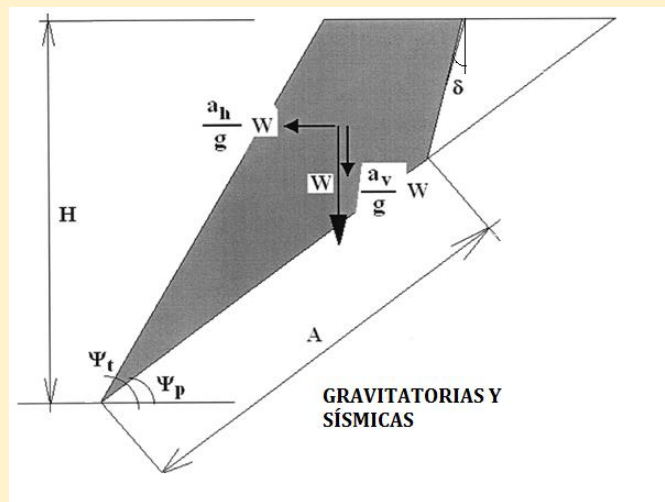


Método de Roturas Planas

Es un método de equilibrio límite (Se compara la resistencia de la superficie de rotura con la carga aplicada). Cargas gravitatorias y sísmicas (voladuras), agua, anclajes...



Cabezo Gordo (Murcia)



El FS nos indica cuanta **resistencia sobrante** tenemos **para las condiciones de carga** consideradas.

$$FS = \frac{c' \cdot A + tg \varphi' \cdot \left\{ W \cdot \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \psi_p - \left(\frac{a_h}{g} \right) \sin \psi_p \right] - U - V \sin(\psi_p + \delta) + T \cdot \cos \theta \right\}}{W \cdot \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \sin \psi_p + \left(\frac{a_h}{g} \right) \cos \psi_p \right] + V \cos(\psi_p + \delta) - T \cdot \sin \theta}$$

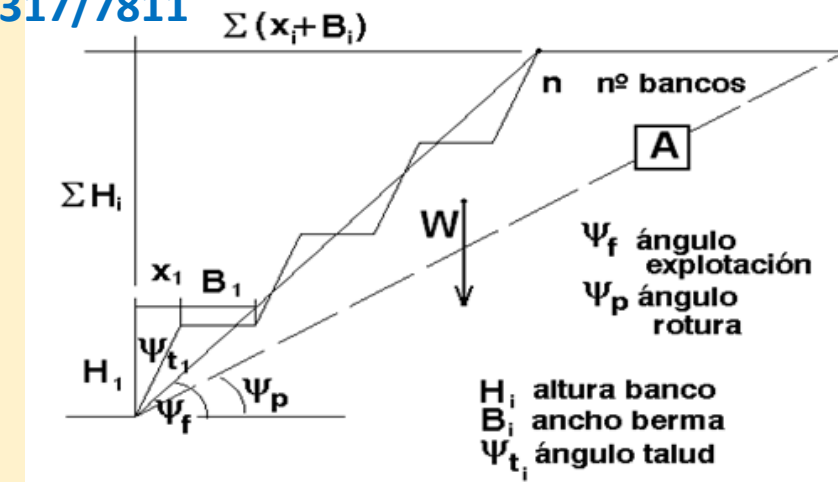
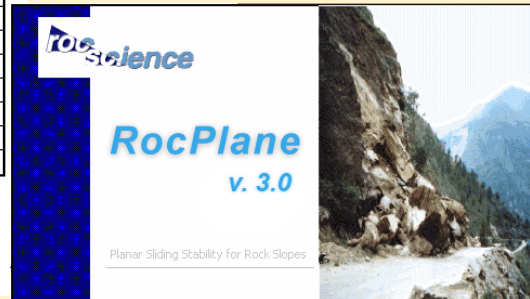
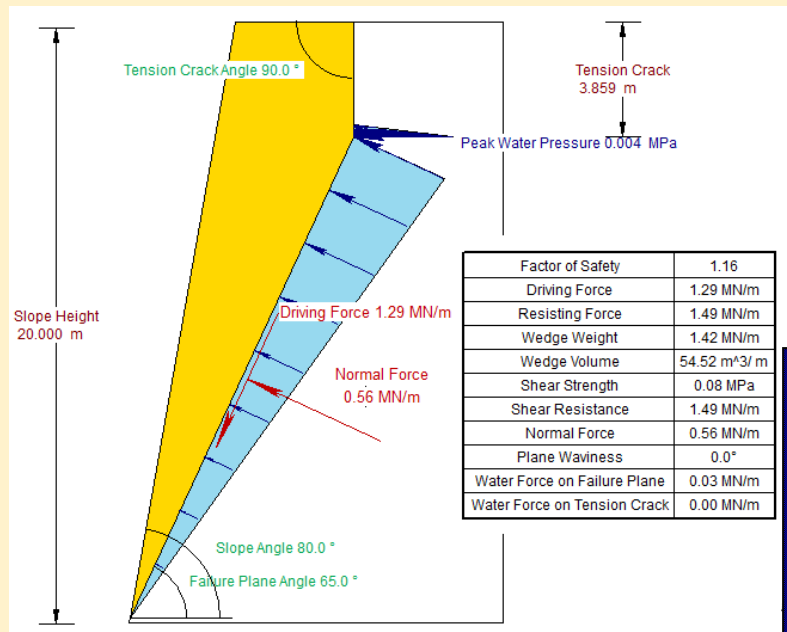


Método de Roturas Planas

La rotura puede afectar uno o varios bancos de explotación, **según la extensión de la diaclasa**. En ese caso, el ángulo de talud es el que va desde el pie del banco inferior a la cabecera del más elevado.

En el repositorio de la UPCT se puede descargar una hoja de evaluación de esta rotura, tanto para **roturas por el diaclasado** como para una **roturas del macizo de roca a mayor escala** (utilizando en cada caso el criterio de resistencia de material que se rompe, Barton o Hoek).

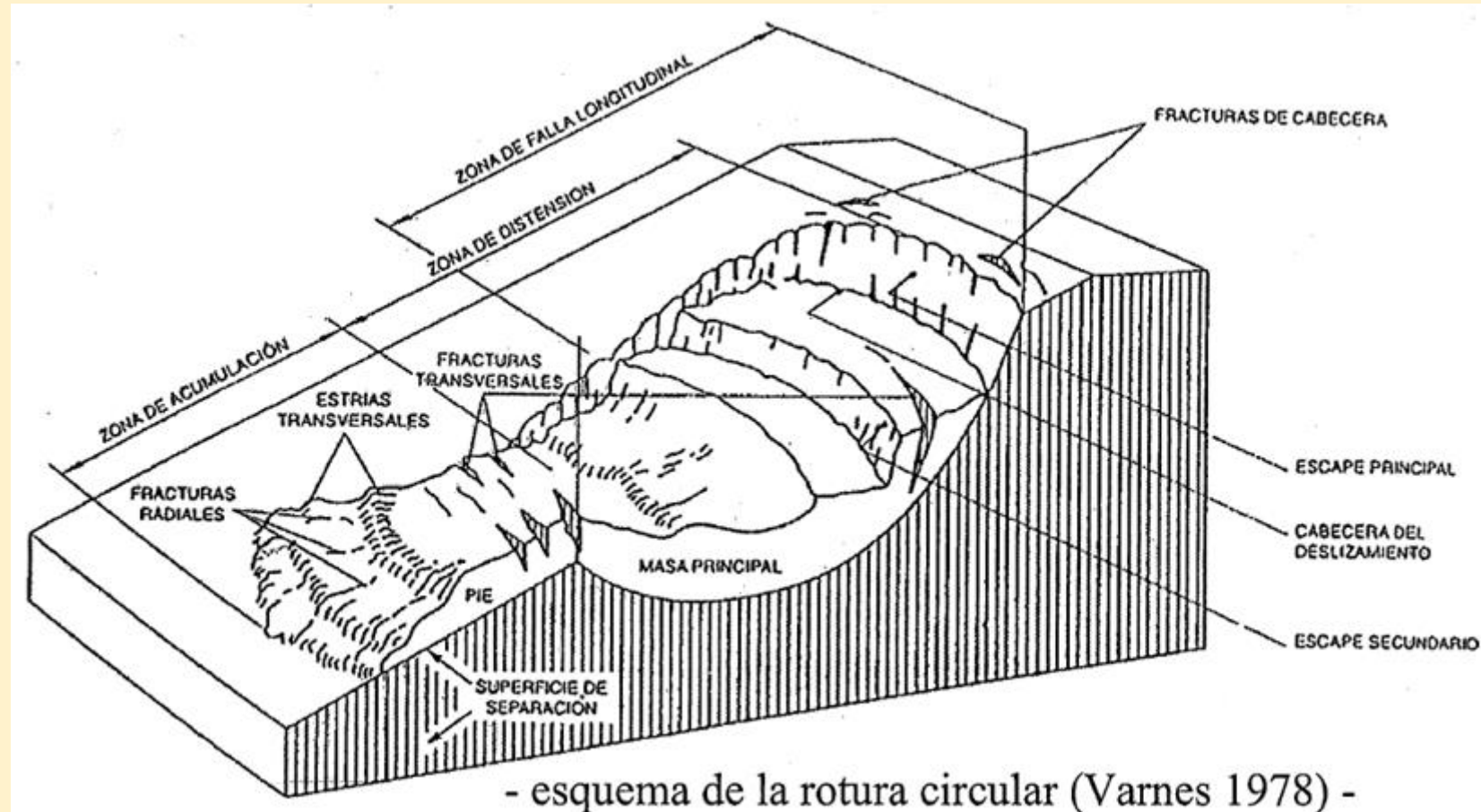
<http://hdl.handle.net/10317/7811>





Método de Roturas Circulares

Ocurre esta rotura en **rocas blandas**, en **diques**, terraplenes y **escombreras**, así como en **grandes taludes** con rocas diaclasadas.



The diagram illustrates the method of slices for slope stability analysis. It shows a soil mass divided into vertical slices by vertical lines. A failure surface is shown as a curved line passing through points A, C, and B. The upper part of the failure surface is labeled "Activa" and the lower part is labeled "Pasiva".

Key forces acting on a slice are shown:

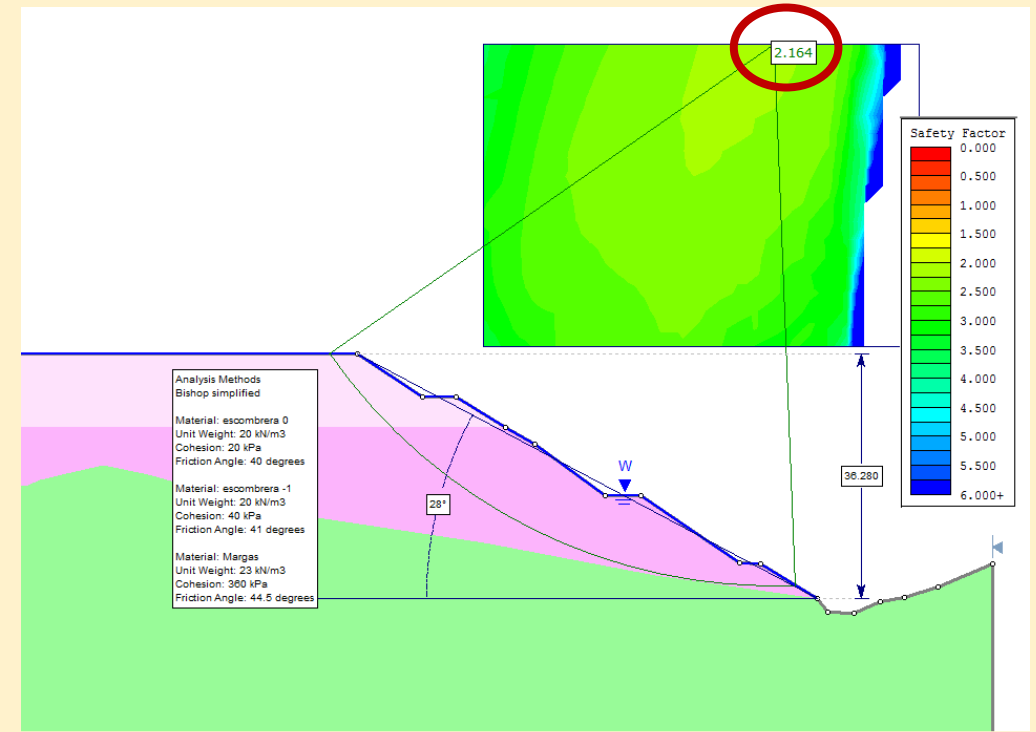
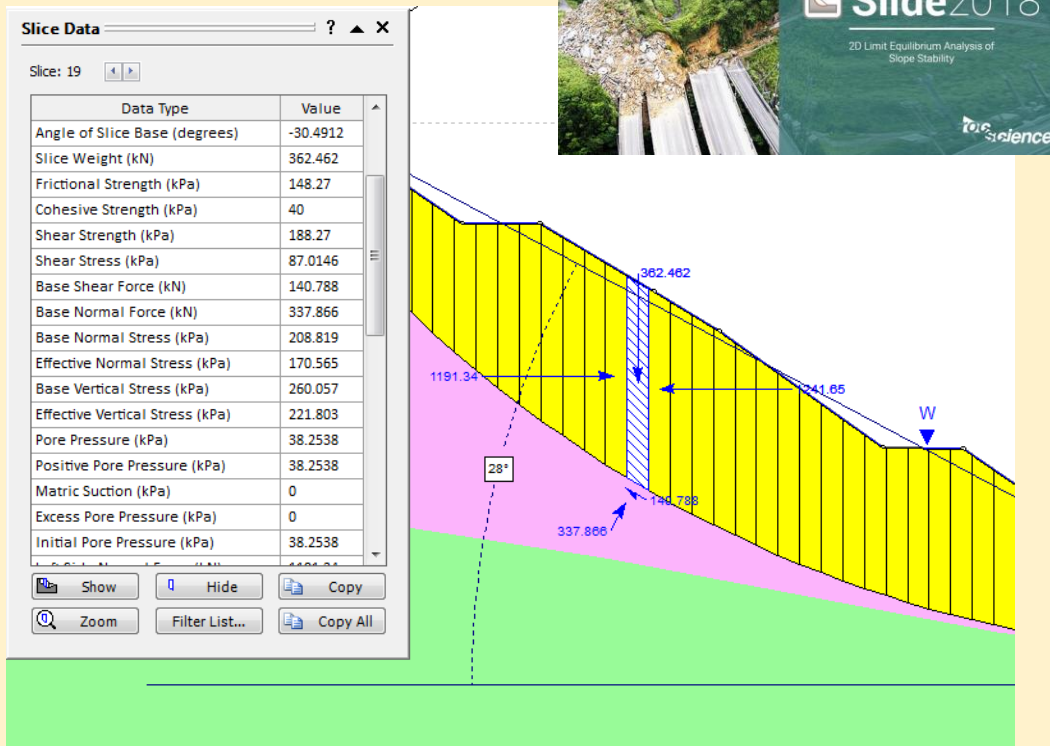
- ΔW : Weight of the slice acting downwards.
- E_{am} , X_{am} : Active earth pressure and its resultant depth from the base.
- E_{um} , X_{um} : Interslice horizontal force and its resultant depth from the base.
- S_m , $N = N' + U$: Interslice shear force and normal force acting along the failure surface at angle α .
- P_{ham} , P_{hpm} : Interslice horizontal pore water pressure and its resultant depth from the base.
- θ'_a , θ'_p : Angles between the failure surface and the horizontal at points A and C.
- ϕ'_m : Friction angle of the soil.
- E_{pm} , X_{pm} : Passive earth pressure and its resultant depth from the base.
- E_{up} , X_{up} : Interslice horizontal force and its resultant depth from the base.
- S_p , $N = N' + U$: Interslice shear force and normal force acting along the failure surface at angle α .
- P_{vam} , P_{vpm} : Interslice vertical pore water pressure and its resultant depth from the base.
- P_{wam} , P_{wpm} : Interslice horizontal pore water pressure and its resultant depth from the base.
- P_{wpm} : Interslice vertical pore water pressure and its resultant depth from the base.

The safety factor FS is given by the following equation:

$$FS = \frac{\sum_1^n [(\Delta W - u\Delta b) \tan \phi' + c' \Delta b] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{1}{FS} \tan \alpha \tan \phi'}}{\sum_1^n \Delta W \tan \alpha}$$



Método de Roturas Circulares



En unos pocos segundos, analiza más de 5.000 círculos de posible rotura y selecciona el de peor FS.

- Multitud de Materiales.
- Diferentes saturaciones o sobrepresiones.
- Superficies de rotura no circulares.
- Incorporación de sostenimientos (micropilotes, bulones...)



Métodos Tenso-Deformacionales

Permiten conocer las **distribuciones de tensión** y la **deformación producida por las cargas** que actúan sobre el talud.

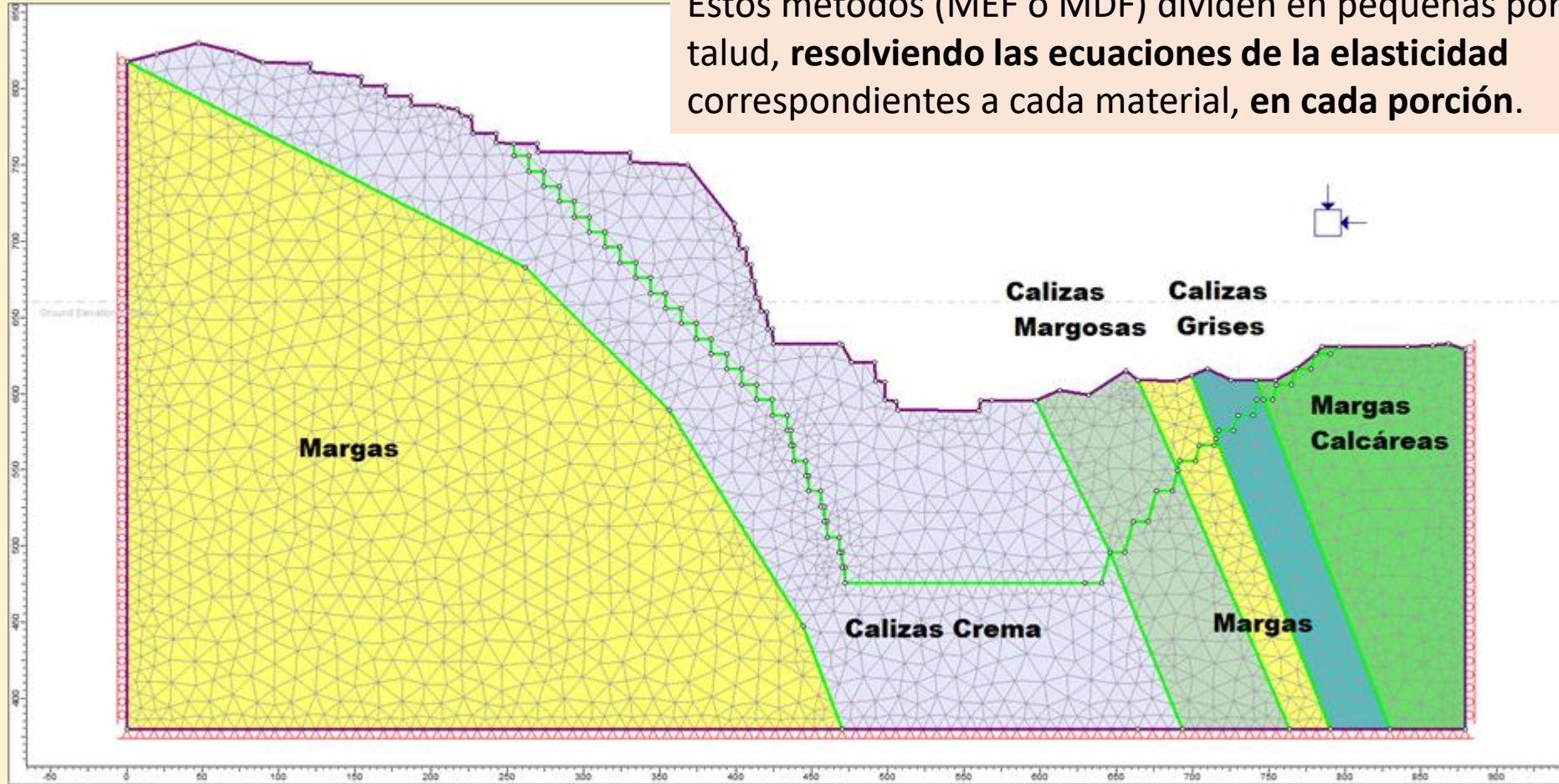
Necesitamos conocer los **módulos elásticos** y el **comportamiento post-rotura** de cada uno de los fragmentos que lleguen a la situación plástica (resistencia residual). También se debe establecer **factor de confinamiento K** (la relación entre las tensiones verticales y horizontales).

El modelo se prepara introduciendo la **geometría, resistencia, condiciones de saturación y cargas sísmicas...** Estableciendo las **condiciones de movimiento del contorno** exterior.



Métodos Tenso-Deformacionales

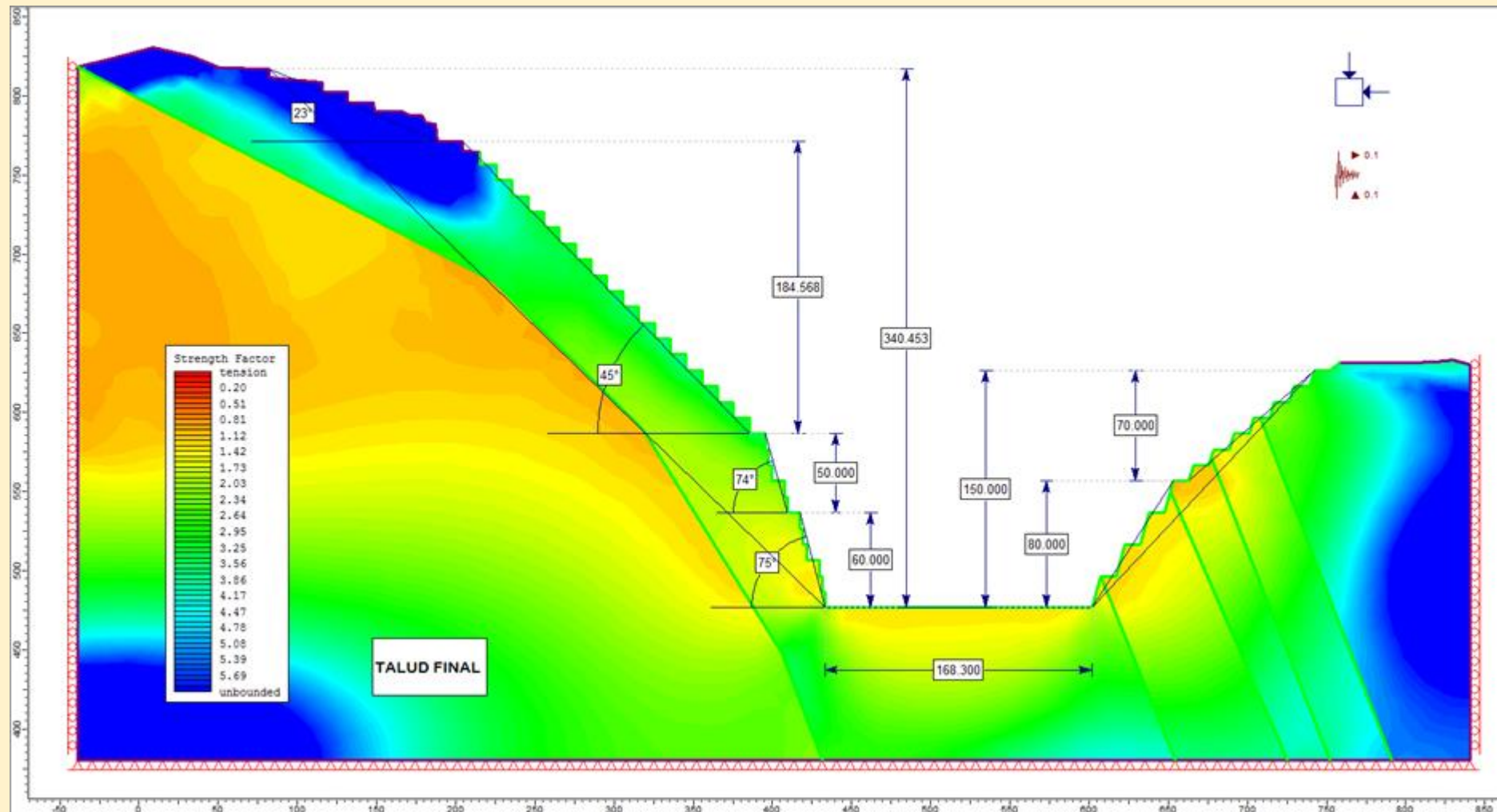
Estos métodos (MEF o MDF) dividen en pequeñas porciones el talud, **resolviendo las ecuaciones de la elasticidad** correspondientes a cada material, **en cada porción.**



Es tremendamente útil el **cálculo** estableciendo etapas del modelo, lo que permite **simular los efectos de la excavación**, según eliminamos materiales **o del relleno**, en caso contrario.



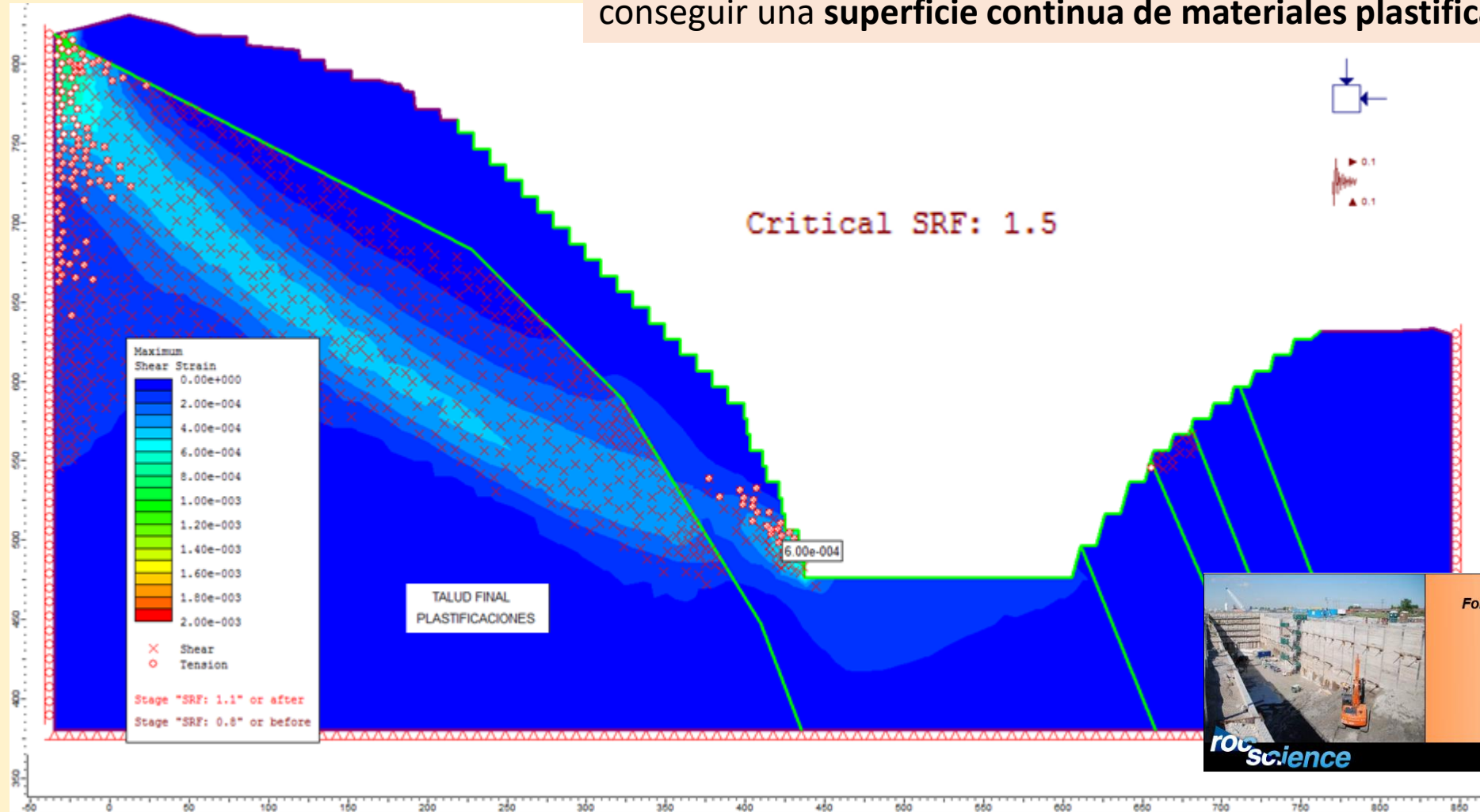
Métodos Tenso-Deformacionales





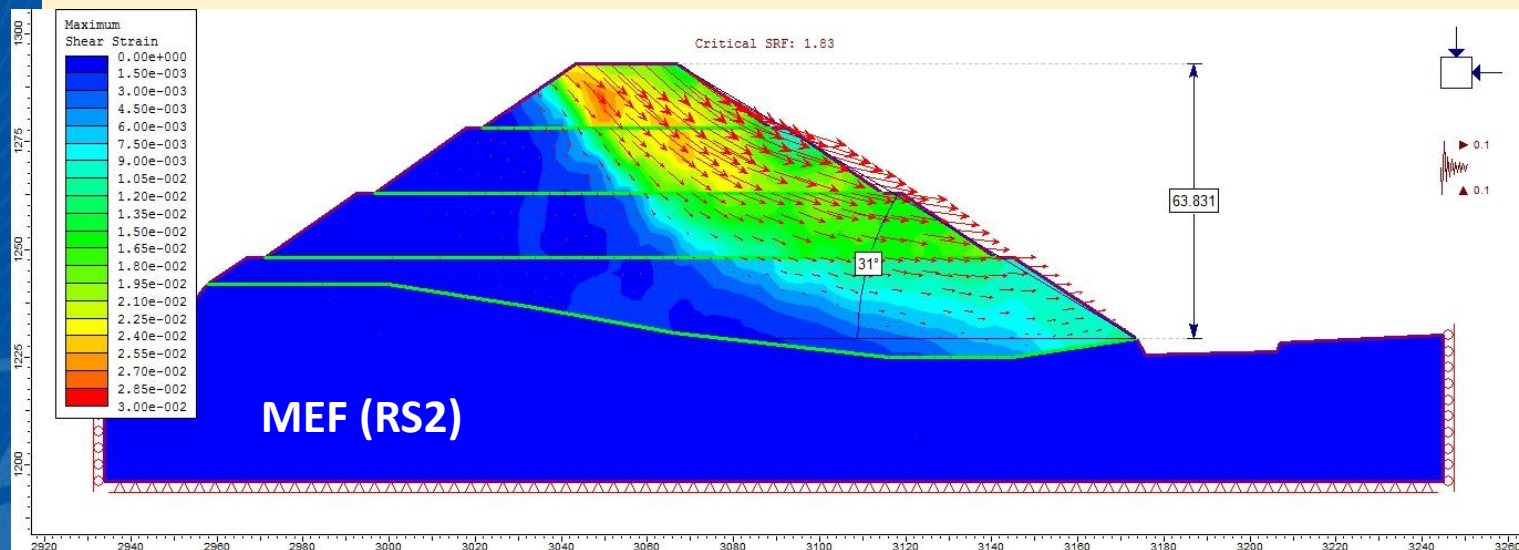
Métodos Tenso-Deformacionales

El FS se consigue mediante la técnica de SRF que consiste en una **progresiva reducción de la resistencia** de los materiales hasta conseguir una **superficie continua de materiales plastificados**.

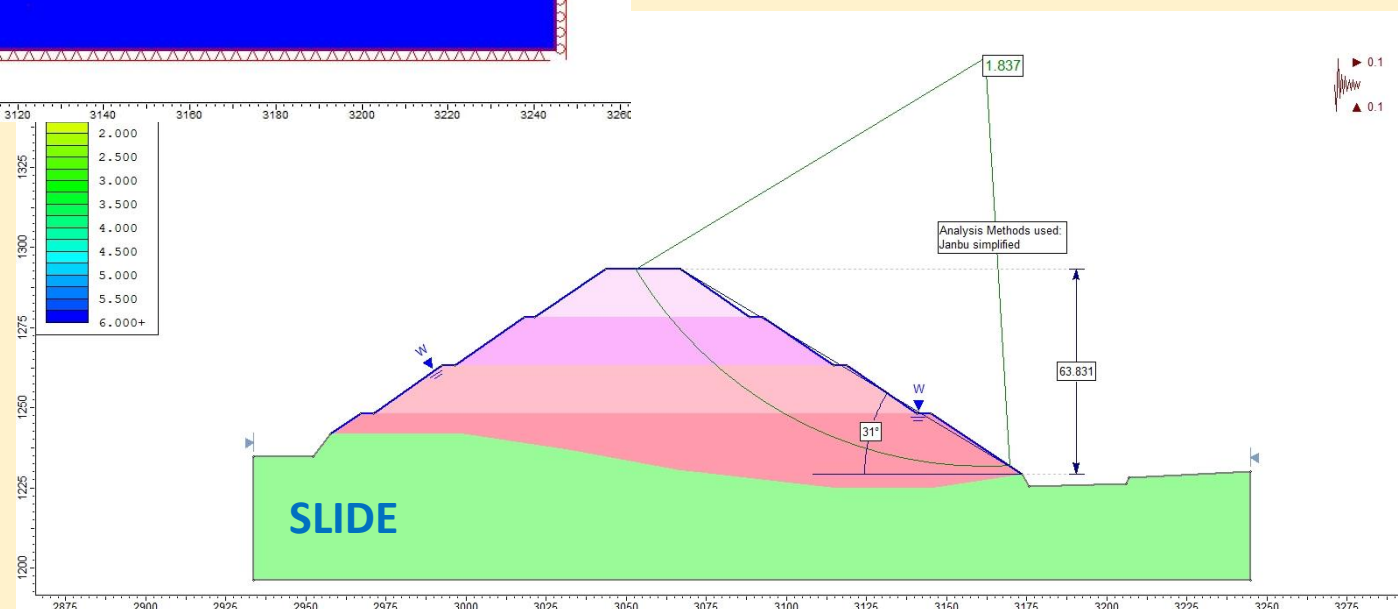




Combinación de métodos TD y EL



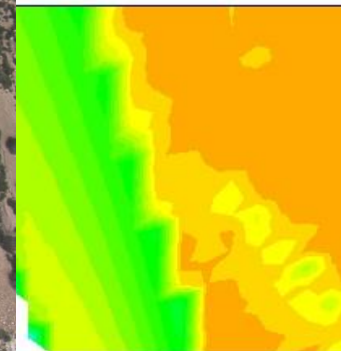
Pinoso (Alicante)



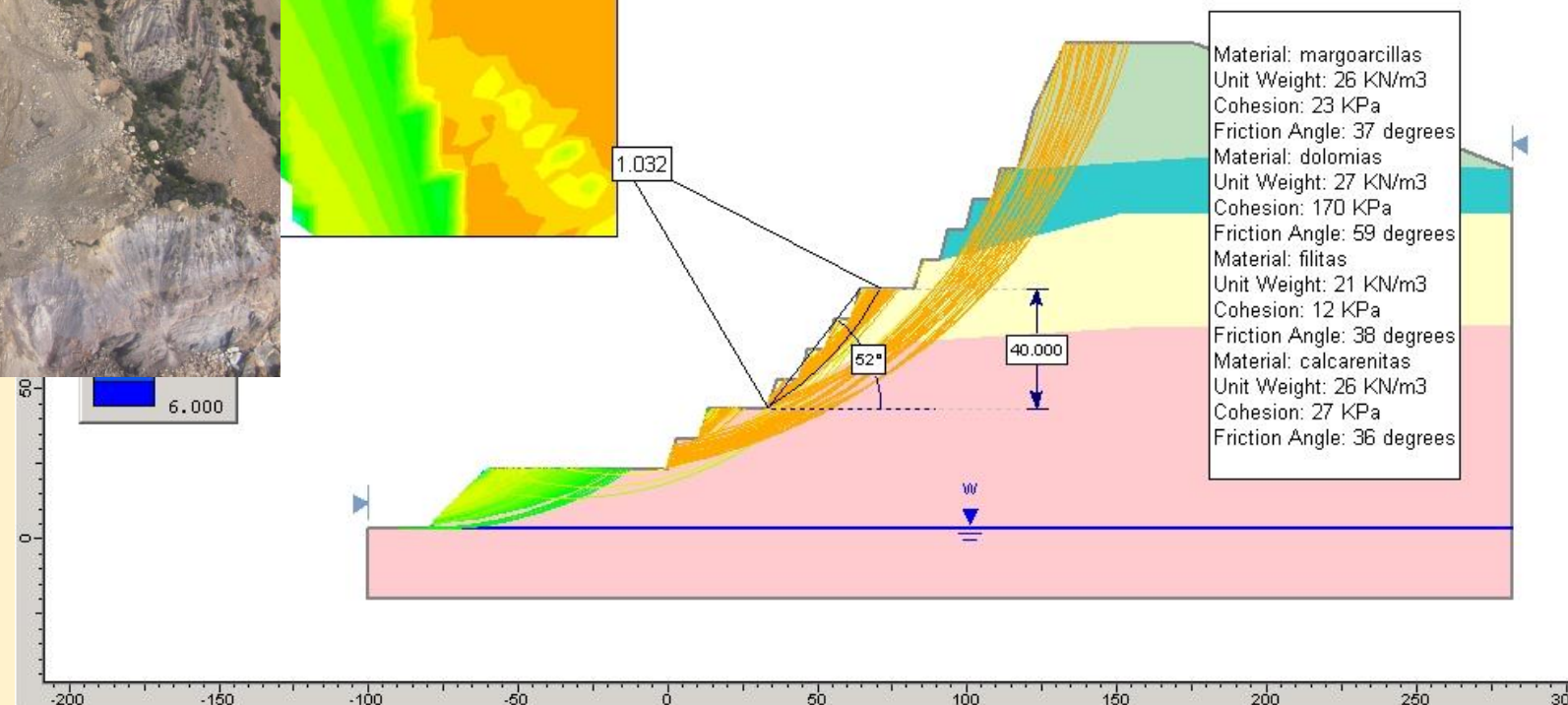


Obtención retrospectiva (feedback) de parámetros de resistencia de rocas

Aguilones (Cartagena)



Deslizamiento de 40 m durante la excavación

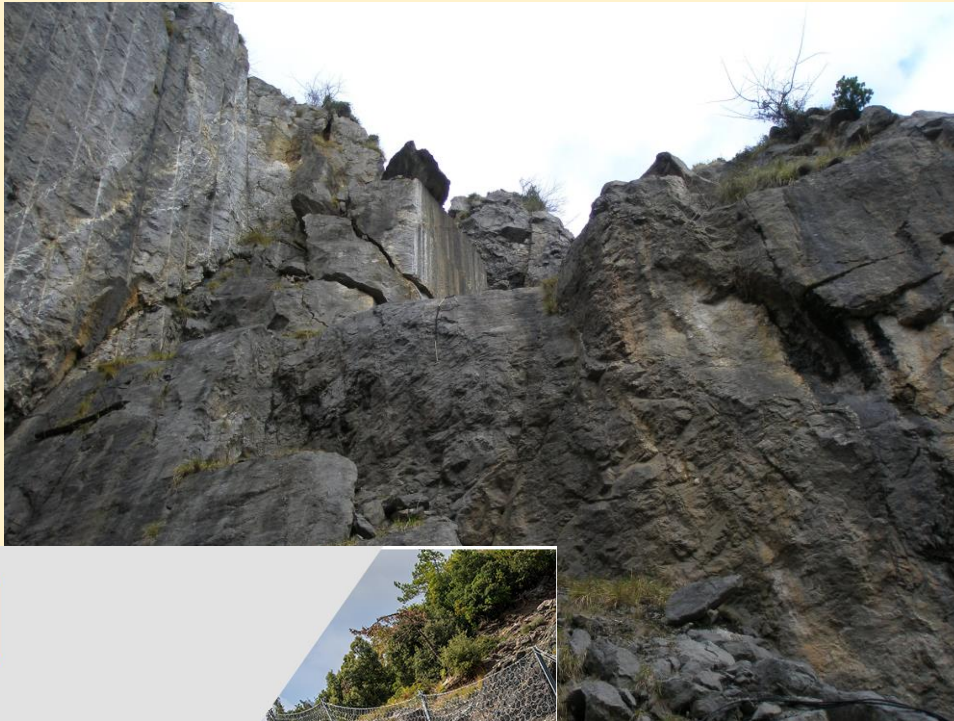




Métodos de análisis de Desprendimientos

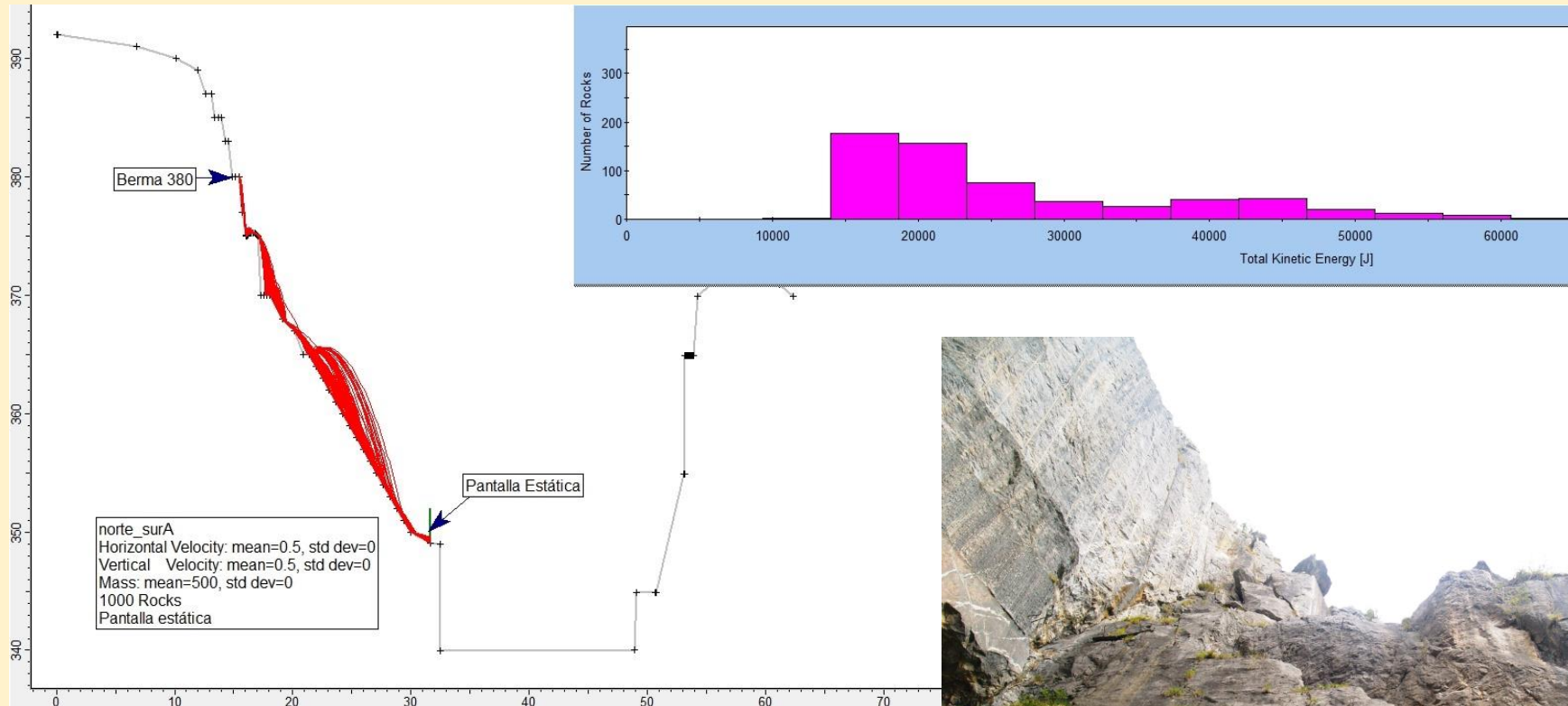
Análisis dinámico de trayectorias

Mediante programas que pueden simular los desprendimientos: **trayectorias y energía**, a partir de los perfiles de talud y de los valores de amortiguación de choques y fricción.





Análisis dinámico de trayectorias

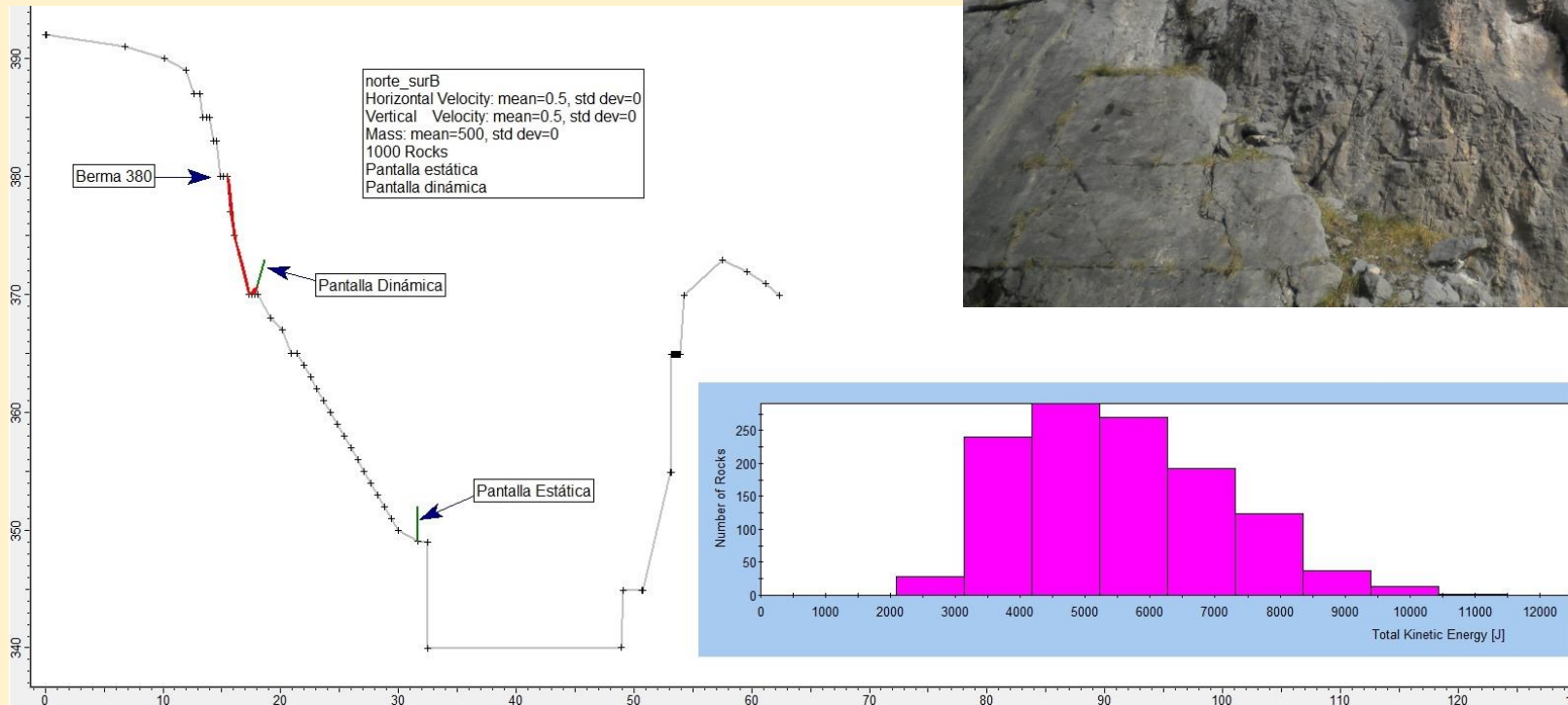


Obtención de **energía y altura de rebote a lo largo del perfil** permite seleccionar los elementos de protección más oportunos y su colocación.





Análisis dinámico de trayectorias



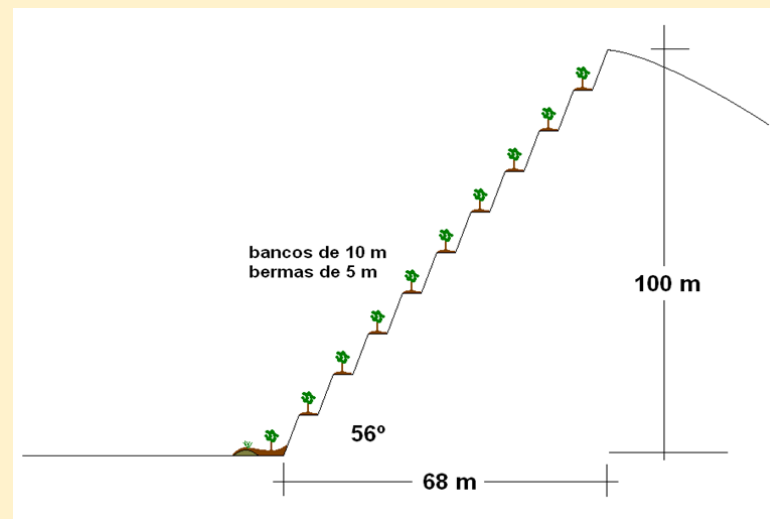


Finalización de taludes

Plan de abandono y restauración

El diseño del talud debe incorporar unas consideraciones encaminadas a **garantizar** el mantenimiento de las condiciones de **estabilidad a largo plazo**:

- Método de excavación final sin daño a la roca remanente: precorte y voladuras de amortiguación.
- Análisis de desprendimientos.
- Inspección, saneo y/o elementos de sostenimiento.
- Desarrollo del drenaje.

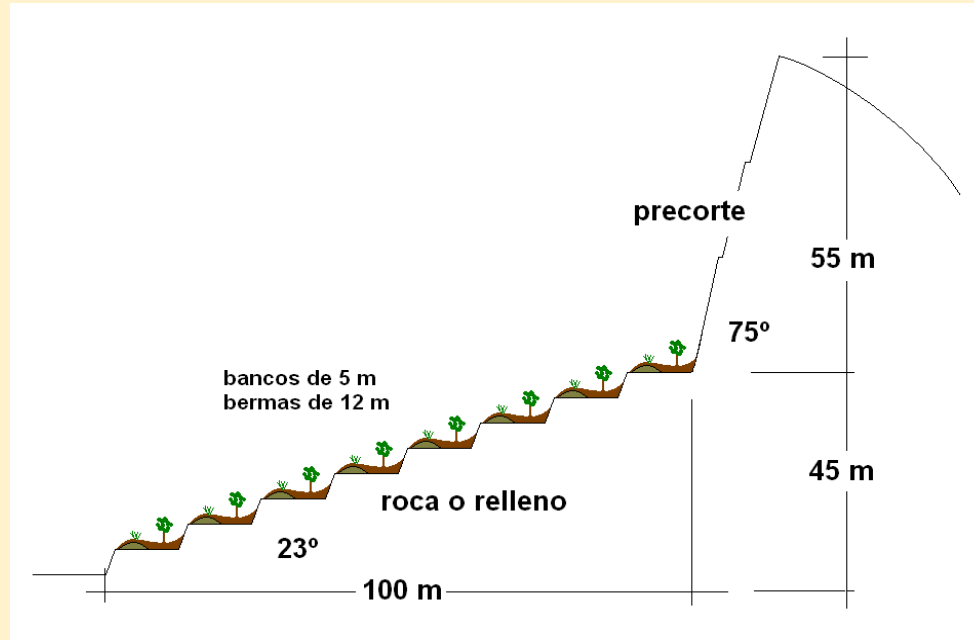


Lastur (Guipúzcoa)



Finalización de taludes

Plan de abandono y restauración



Los elementos blandos del relieve remodelado: **rellenos**, **coberturas** y **escombreras** se vienen realizando con **formas rectilíneas** y **elementos de drenaje artificiales** (bajantes y cunetas). Por este motivo pasa poco tiempo hasta que se produce la erosión, particularmente con regímenes pluviométricos torrenciales. Rápido deterioro, apareciendo cárcavas y roturas circulares de taludes.



Cox (Alicante)

Moratalla (Murcia)





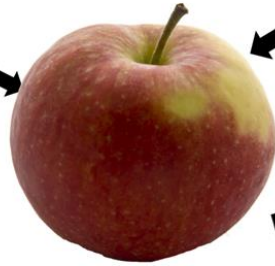
Finalización de taludes

Sellado de residuos mineros

Conditions Imposed on Covers

Physical Processes

- Erosion
- Slope Instability
- Wet/Dry Cycles
- Freeze/Thaw Cycles
- Consolidation/Settlement
- Extreme Climate Events
- Brush Fires
- Construction

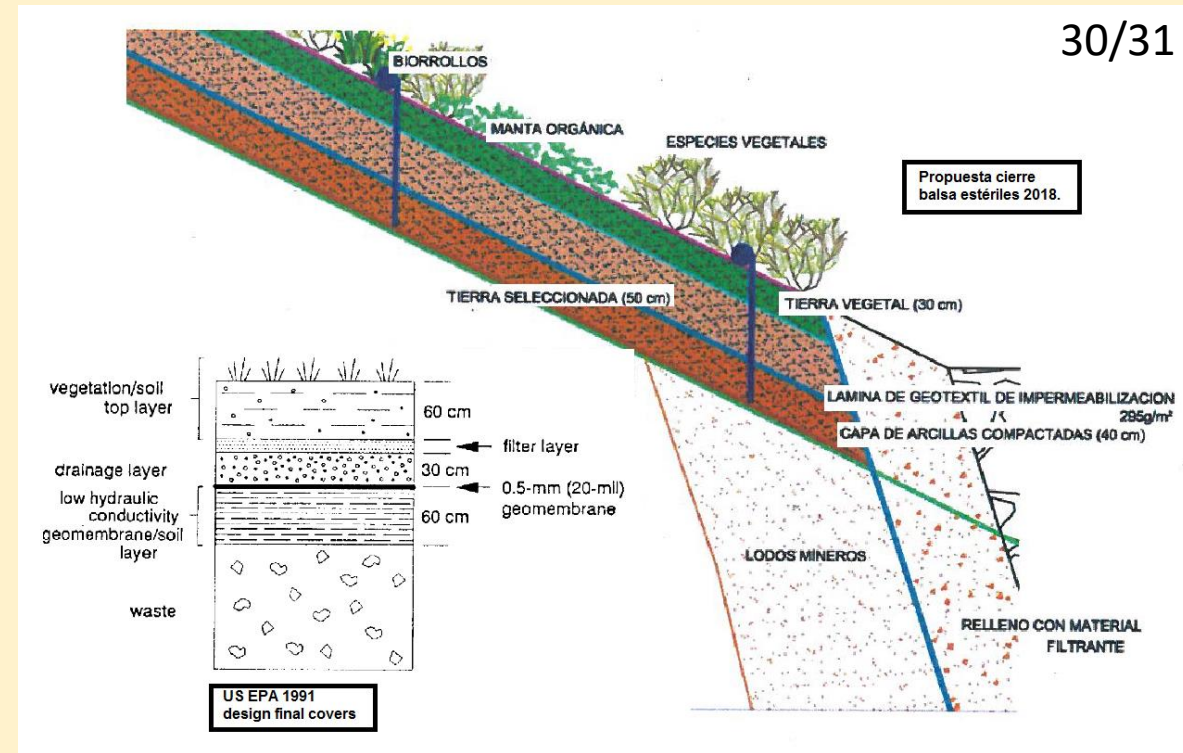


Chemical Processes

- Osmotic Consolidation
- Dispersion/Erosion
- Dissolution/Precipitation
- Acidic Hydrolysis
- Mineralogical Consolidation
- Sorption
- Salinization
- Oxidation

Biological Processes

- Root Penetration
- Burrowing Animals
- Bioturbation
- Human Intervention
- Bacteriological Clogging
- Vegetation Establishment





Finalización de taludes

Taludes singulares y “arquitectura” de taludes



GRACIAS POR SU ATENCIÓN
emilio.trigueros@upct.es





Universidad
Politécnica
de Cartagena

GRACIAS POR SU ATENCIÓN
emilio.trigueros@upct.es



Rio Tinto 2018 (Huelva)