



# Jornadas técnicas de gestión de taludes

## **Comportamientos atípicos en taludes de excavación**

*Presentación elaborada por:*

*Eduardo Pradera Gámez*

*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos*

Barcelona, 26 de noviembre de 2015

# Índice

## 1 La Estabilidad de Taludes.

Casuística general.

## 2 Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades.

Disposición estructural.

Macizo general.

Reajuste tensional.

Solicitud tensional.

## 3 Disposición “al hilo” con buzamiento desfavorable.

Rotura planar combinada.

Análisis con elementos finitos y juntas ubícuotas.

Casos prácticos

## 4 Disposición “al hilo” con buzamiento favorable.

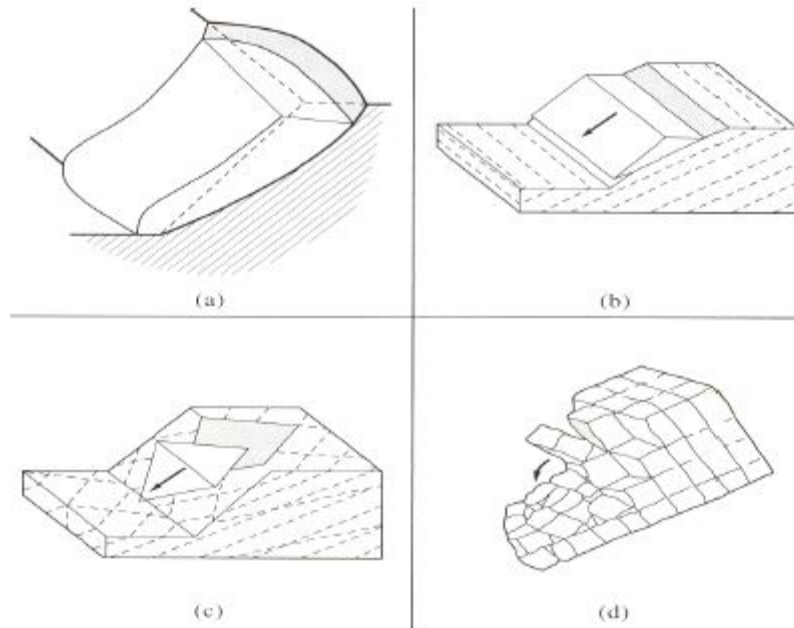
Cabeceo tensional.

Casos prácticos.

# 1. La Estabilidad de Taludes.

## Casuística general

La estabilidad de los taludes de excavación constituye un problema básico en el campo de la Geotecnia en General y de las obras lineales en particular. Como tal constituye una ciencia sobradamente conocida, bien manejada con las técnicas habituales.



**Figure 5: The four basic mechanisms of rock slope instability: (a) circular slip; (b) plane sliding; (c) wedge sliding; and (d) toppling [(a) after Hudson and Harrison, 1997, (b), (c), and (d) after Matheson, 1983]**

### TIPOS DE ROTURAS

El primer caso corresponde a medios homogéneos de isótopos.

Los otros tres responde al terrenos con marcada anisotropía orientada de manera claramente desfavorable.

Los problemas relacionados con estas tipologías tienen una correcta solución con las técnicas habituales de reconocimiento, análisis y cálculo.

Las soluciones son claras y no suelen dar problemas en la etapa de mantenimiento salvo por circunstancias excepcionales, normalmente de tipo meteorológico.

## 2. Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades. Disposición estructural.

Se produce con terrenos con una marcada anisotropía dispuesta con una orientación sensiblemente coincidente con la del talud (**disposición "al hilo"**), sin que se llegue a producirse el descalce de las discontinuidades.

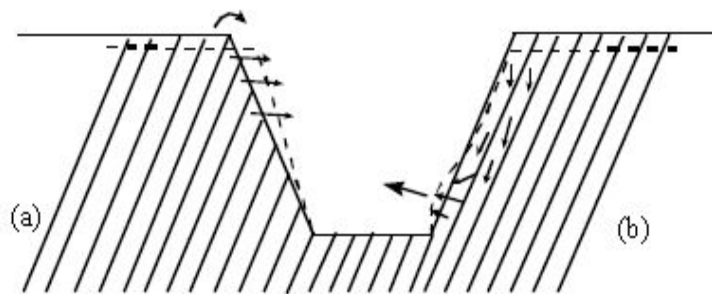


Figure 1. A schematic of slopes in a foliated rock mass:  
(a) Flexural toppling and (b) Flexural buckling

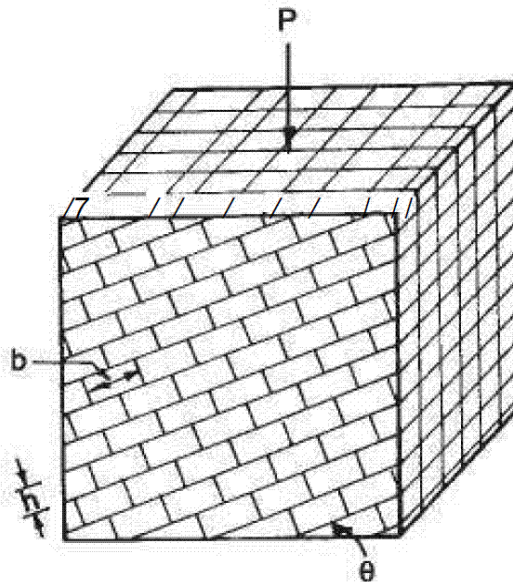
La situación de la derecha corresponde a una disposición desfavorable sin que llegue a producirse la salida al talud.  
La de la izquierda corresponde a una disposición favorable, creando una situación de vuelco (TOPPLING, FLEXURAL TOPPLING, etc.)

1. En ambos casos la disposición de la **anisotropía no es claramente desfavorable pero es ALTAMENTE PELIGROSA**.
2. **Se suele analizar bajo la casuística de la problemática general** antes comentada.
3. Sin embargo cuando afecta terrenos muy fracturados y de la roca matriz débil o alterable, suele dar lugar a diseños con **problemas latentes de estabilidad general** que pueden provocar **fallos a medio o largo plazo**, lo que les hace especialmente peligrosos desde el punto de vista del mantenimiento ya que puede coincidir con la fase de explotación.
4. Por otra parte los **síntomas de ambos fenómenos suelen ser mal interpretados** en fase de obra o durante la explotación, lo que suele conducir a actuaciones correctoras excesivas.

## 2. Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades. Macizo general (1/2).

Adicionalmente a la disposición estructural "al hilo", el riesgo se hace mayor cuando:

- ✓El macizo se presenta altamente fracturado.
- ✓La roca matriz que lo constituye presenta:
  - Baja resistencia.
  - Alta capacidad de alteración



Type - D

El macizo presenta una familia de discontinuidades principales que constituye su estructura.

Adicionalmente contiene una o varias familias de discontinuidades menores que configuran, con la anterior, un sistema de bloques.

## 2. Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades. Macizo general (2/2).

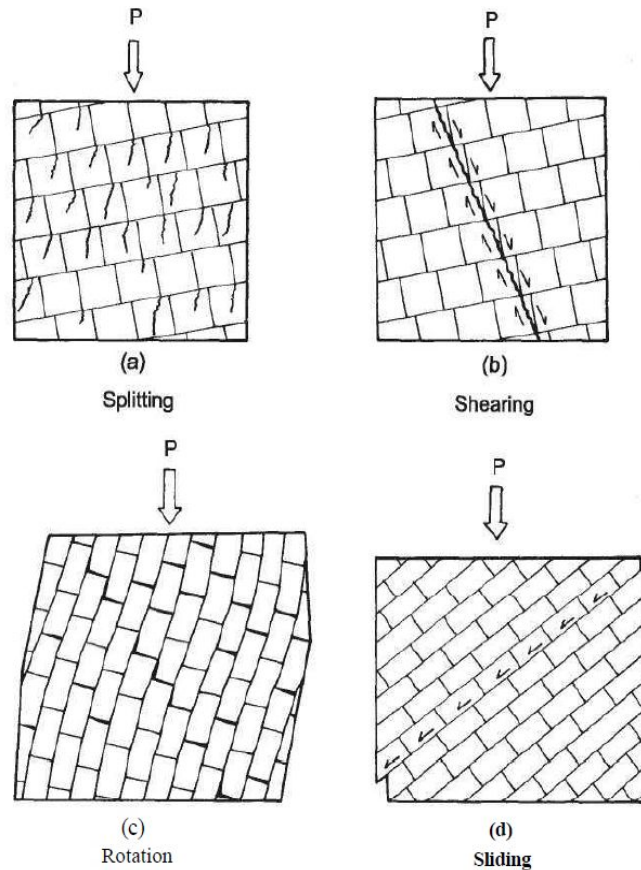


Fig. 3. Modes of failure of jointed mass Singh et al., 2002).

- a. En este tipo de terrenos pueden producirse diferentes tipos de rotura en función de la solicitación tensional o la que se vea sometido.
- b. Dependiendo de la orientación de la misma respecto de la estructura del macizo.

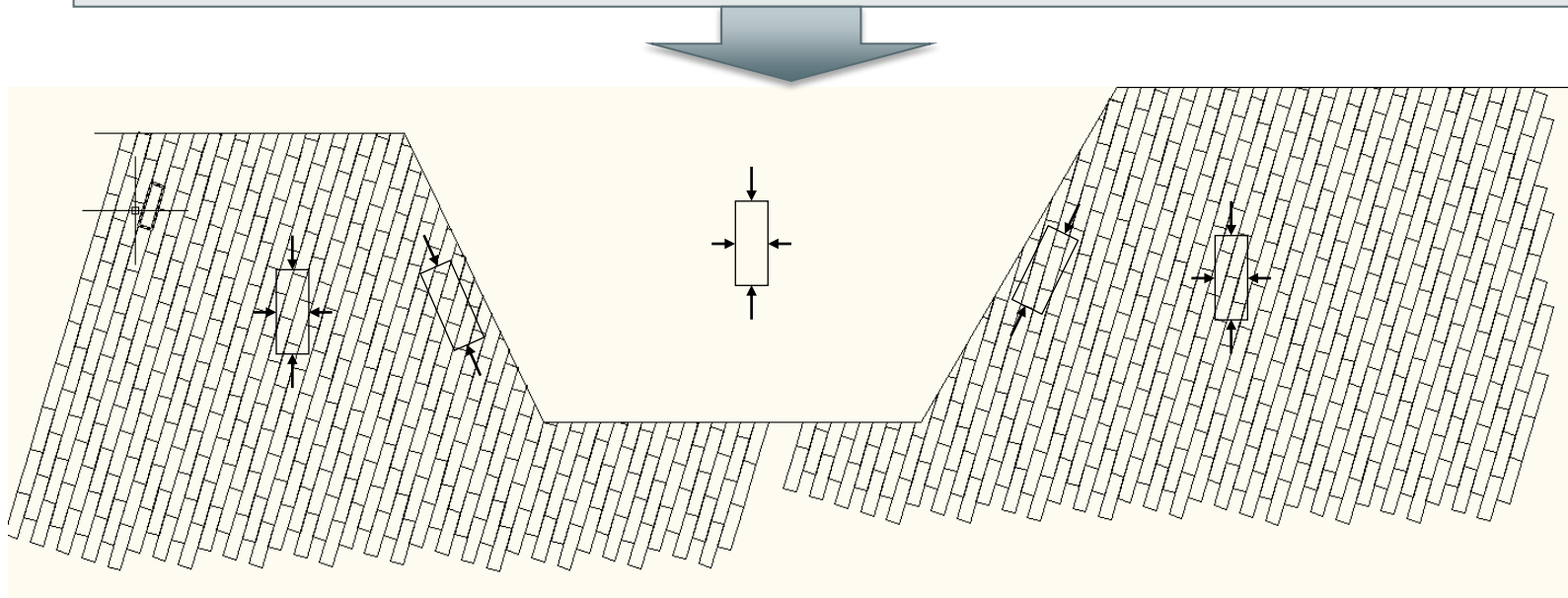
## 2. Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades. Reajuste tensional.

La excavación del talud produce un reajuste tensional en la zona del macizo afectado que se esquematiza en la figura.

En las proximidades del talud la tensión principal mayor se orienta paralelamente al mismo mientras que la tensión principal menor se hace cero.

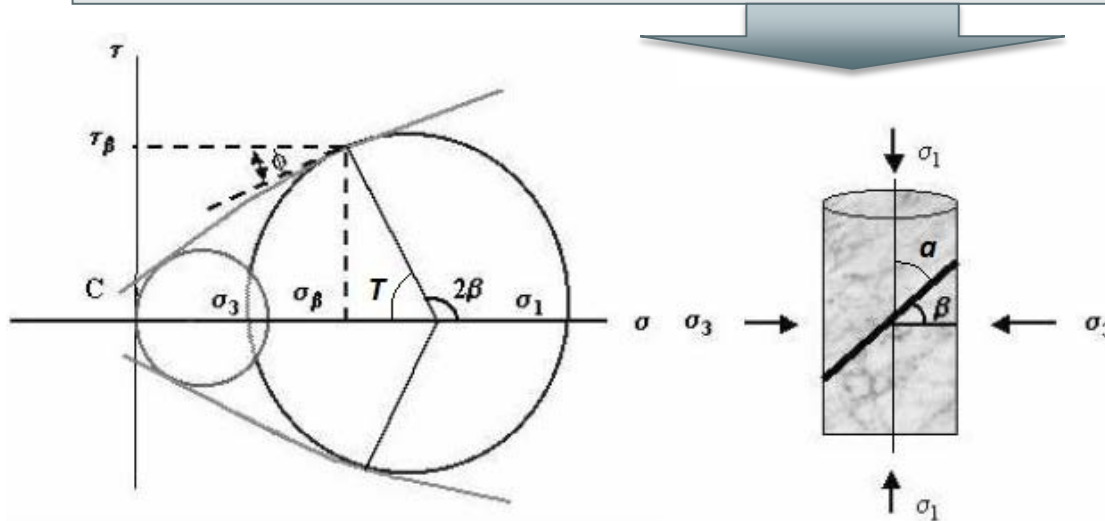
En la zona más alejada las tensiones principales mantienen la situación y valores originales (en principio con orientación vertical).

Entre ambas se produce una transición de orientaciones.



## 2. Situaciones de riesgo de estabilidad condicionados por discontinuidades. Solicitación tensional.

En cada elemento del macizo se obtienen unas sollicitaciones a cortante diferentes para cada orientación relativa a las tensiones principales, de acuerdo con el diagrama de Mohr-Coulomb



En la figura se cumplen las ecuaciones:

$$T + \phi = 90^\circ$$

Siendo  $\phi$  el ángulo de rozamiento del terreno.

$$T + 2\beta = 180^\circ$$

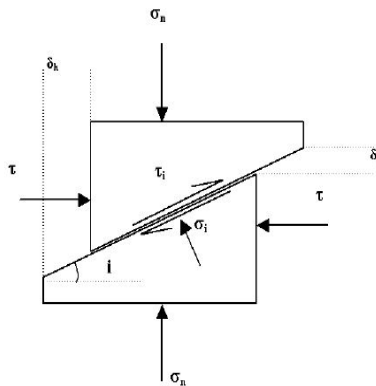
$$a + \beta = 90^\circ$$

Deduciéndose como **orientación pésima**:

$$\underline{a = 45^\circ - \phi/2}$$

$$\tau_i = \tau \cdot \cos^2 i - \sigma_n \cdot \text{sen} i \cdot \text{cos} i$$

$$\sigma_{n_i} = \sigma_n \cdot \cos^2 i + \tau \cdot \text{sen} i \cdot \text{cos} i$$

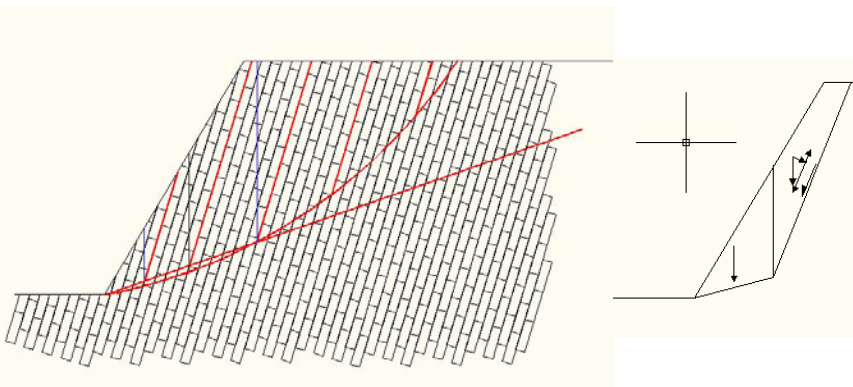


1. Si existe una discontinuidad se produce en las sollicitaciones en la misma que se indican en la figura.
2. Si se sobrepasa la resistencia al corte de la junta se produce la plastificación de la misma, pasando a resistir en residual.

### 3. Disposición "al hilo" con buzamiento desfavorable. Rotura planar combinada (1/3).

#### Disposición "al hilo" y buzamiento desfavorable (rotura planar combinada)

Suele producirse que a lo largo de los planos de la discontinuidad principal se sobrepase ampliamente la resistencia al corte, por lo que se alcanza la plastificación en los mismos, generándose una **sobrecarga al pie del talud**.



Se generan multitud de **mecanismos de cuña activa y pasiva** en las cuales la primera es altamente inestable mientras que la segunda es estable, actuando a modo de muro de contención.

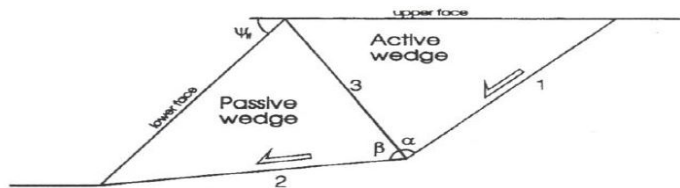


Figure 10: Geometry of active/passive wedge failure mechanism (Nathanai 1996)

Se produce una **sobrecarga tensional en la zona del pie del talud**.

Se produce un proceso de **alteración y fluencia** favorecida por las aguas de infiltración y de escorrentía.

Se inician **procesos de deformación** en los mecanismos de cuña activa/pasiva más superficiales.

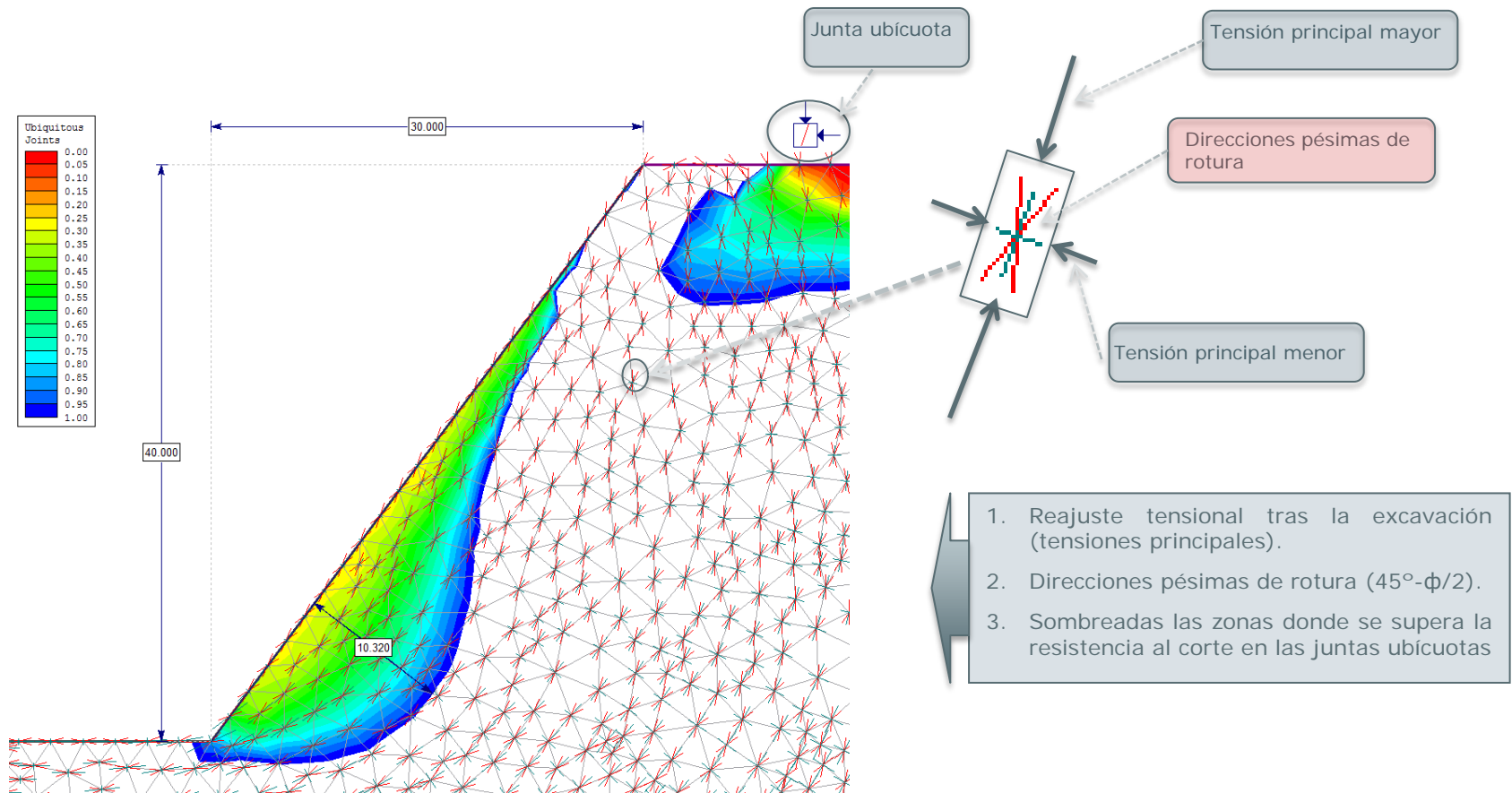
**Rotura con salida por el pie del talud**, por fallo del macizo que pasa a **resistencia residual**.

Debilitamiento del resto de los mecanismos de cuña activa/pasiva, ampliando la masa afectada por la rotura (**rotura progresiva**).





## 2. Disposición "al hilo" con buzamiento desfavorable. Análisis con elementos finitos y juntas ubicuotas.



### 3. Disposición “al hilo” con buzamiento desfavorable. Caso práctico de talud carretero (1/5).

---

Desmante carretero de 24 m de altura máxima excavado al 1(H):1(V) construido a lo largo del año 2.010 con una serie de medidas de estabilización consistentes en bulones de 25mm dispuestos en malla 3x3 m<sup>2</sup>, de 5 m de longitud, geomalla anti erosión tipo Trinter y malla metálica de triple torsión.



1. El terreno afectado fueron limolitas y argilitas en la mitad izquierda del talud y areniscas en el lado derecho.
2. El cálculo de los bulones se hizo mediante el análisis del roturas planares tipocuña.

### 3. Disposición “al hilo” con buzamiento desfavorable. Caso práctico de talud carretero (2/5).

---

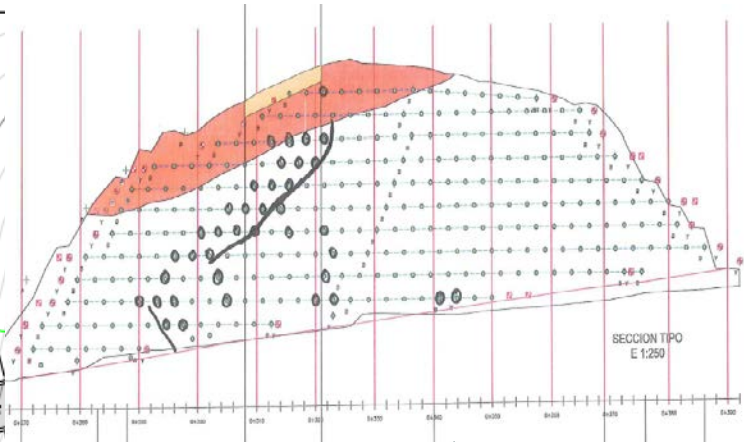
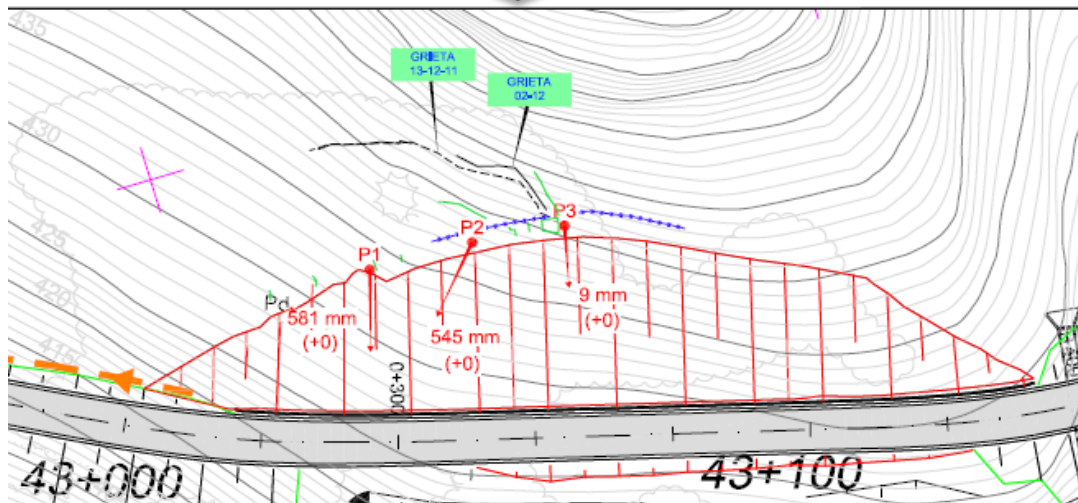
En el año 2013, tres años después de finalizar la construcción la situación del talud era la que se observa en las fotografías.



Como puede observarse el talud estaba parcialmente colonizado por la vegetación presentan adicionalmente síntomas de fuertes movimientos en la superficie del talud y en coronación

### 3. Disposición "al hilo" con buzamiento desfavorable. Caso práctico de talud carretero(3/5).

El control de movimientos puso de manifiesto los valores que se reflejan en el plano, junto con la apertura de una serie de grietas en cabeza.

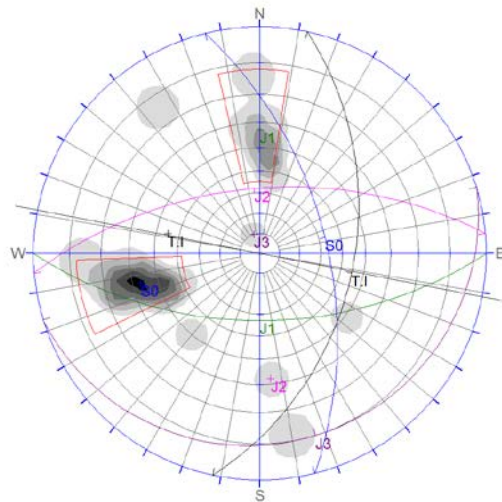


Igualmente se apreció el clavado de muchos de los bulones de sujeción de las mallas dispuestas, lo que por otra parte no es excesivamente relevante pequeña dimensión de las placas de reparto



### 3. Disposición "al hilo" con buzamiento desfavorable. Caso practico de talud carretero (4/5)

La información disponible sobre discontinuidades en el macizo rocoso es la que se indica en el esquema siguiente.



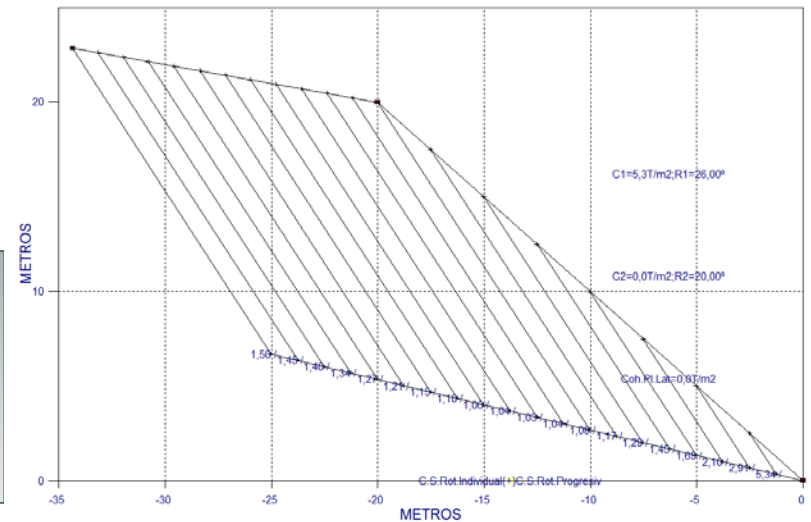
TRAMOS 1,2, 3 Y 10

Orientations	
ID	Dip / Direction
1	58 / 355
2	10 / 163
3	45 / 102
1 w	57 / 076
2 w	57 / 180

Equal Angle  
Lower Hemisphere  
22 Poles  
22 Entries

1. Con esta disposición se produce la situación reflejada en la figura, en la que la zona de pie del talud resulta sobrecargada.
2. Ello provoca un reajuste tenso-deformacional muy dilatado a lo largo del tiempo, sin que hasta el momento se hubiera el fallo a rotura.

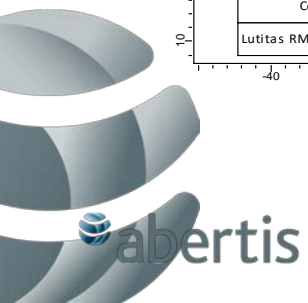
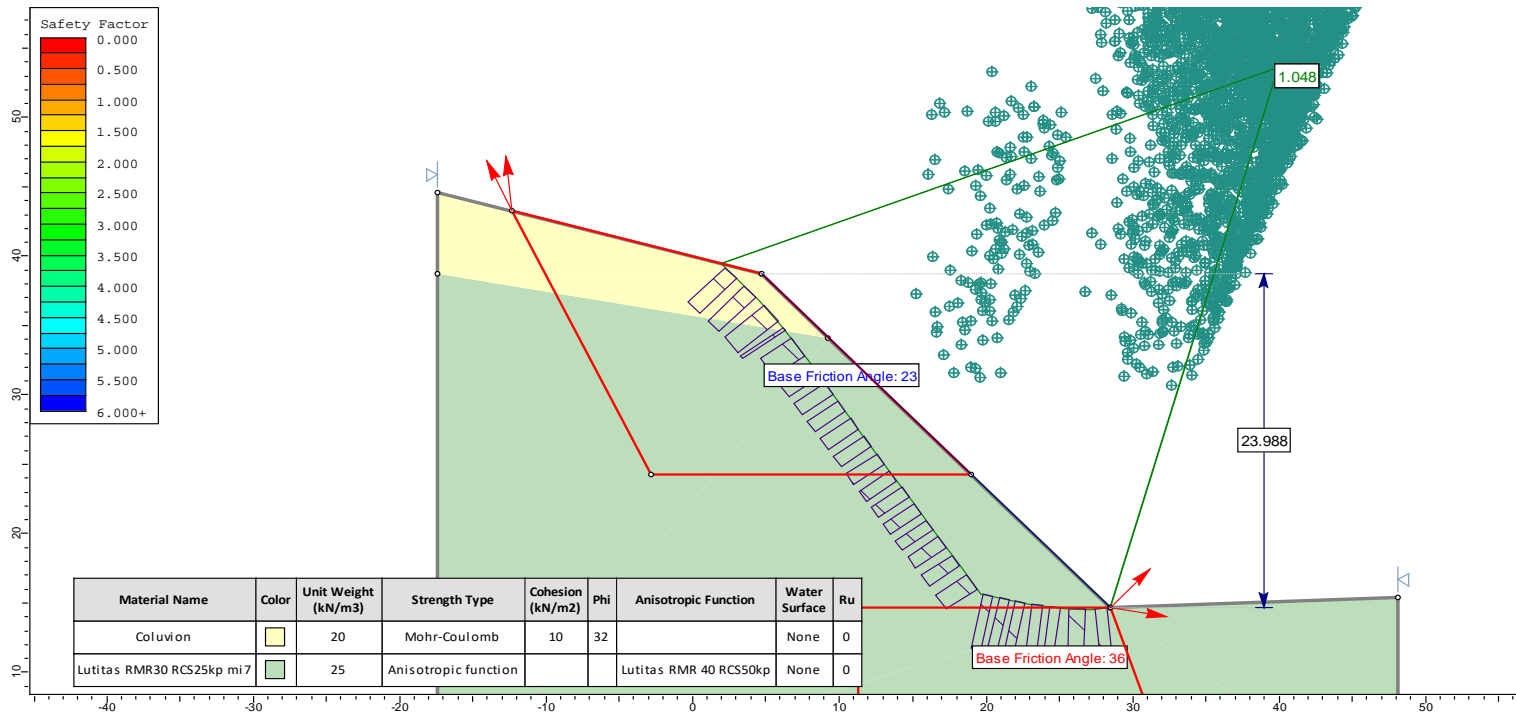
Se observa que la esquistosidad que constituye la estructura principal del macizo se orienta sensiblemente paralela al talud con un buzamiento medio de 58°, lo que hace que las mismas no resultantes descalzados por el talud (45°).



# 3. Disposición "al hilo" con buzamiento desfavorable.

## Caso practico de talud carretero (5/5)

El estudio final con un programa de cálculo de equilibrio límite (SLIDE) introduciendo la anisotropía que supone la presencia de los planos de esquistosidad, arroja resultados similares a los obtenidos con el procedimiento anterior, lo que permitido el ajuste de las soluciones.

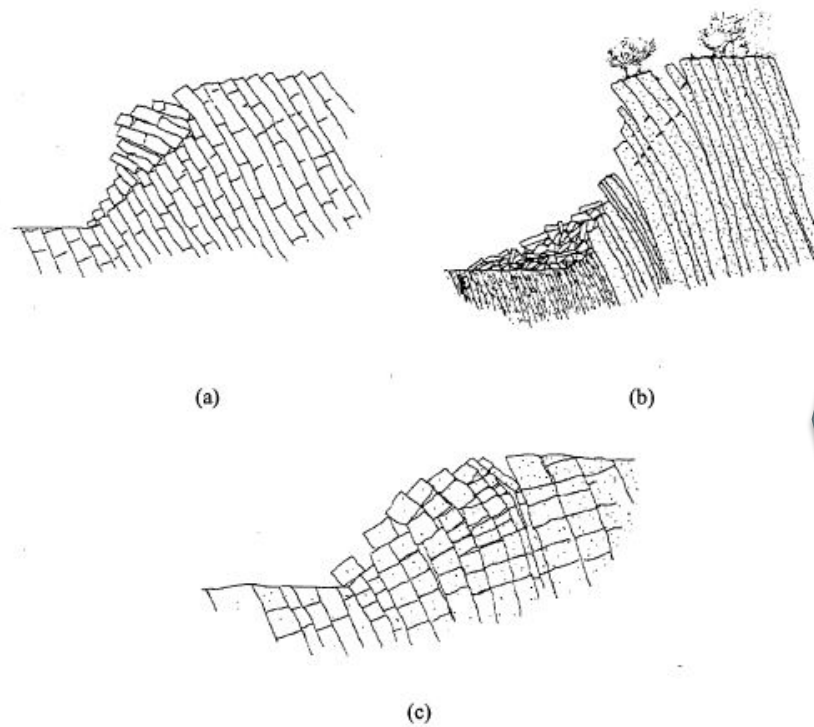


## 4. Disposición “al hilo” con buzamiento favorable.

### Cabeceo tensional (1/6)

Se produce cuando el macizo contiene una disposición estructural condicionada por la presencia de un sistema principal orientado con la excavación y con un buzamiento de sentido contrario.

Cuando se afectan a macizos que roca matriz sana no excesivamente fracturada existen posibilidades de roturas bastante bien estudiadas en la bibliografía y que responden a las tipologías que se indican en la figura siguiente.



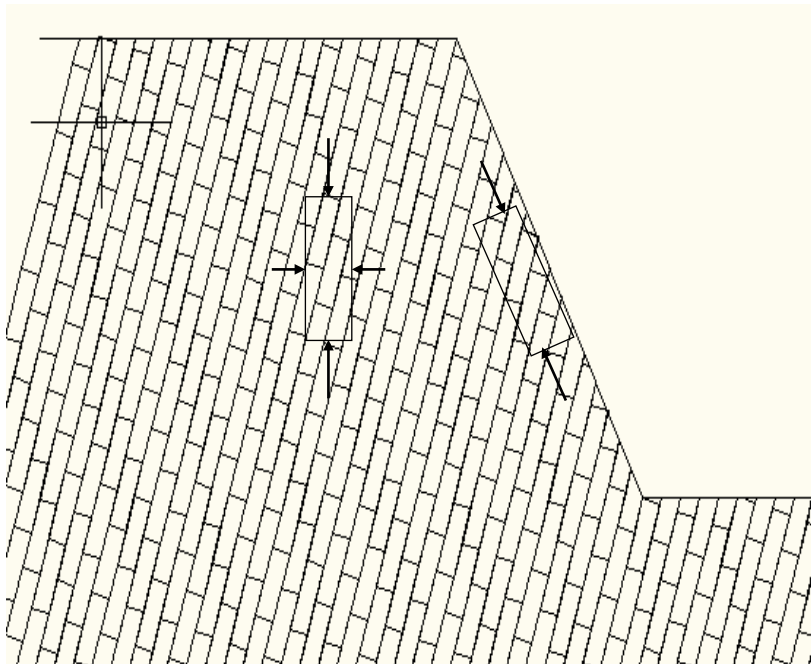
Este tipo de roturas quedan fuera del alcance de esta charla, ya que no suelen producir problemas a medio largo plazo salvo por cuestiones climatológicas desfavorables.

Figure 2-1: Types of Toppling: (a) block toppling; (b) flexural toppling; (c) block flexure toppling (after Goodman and Bray, 1976, Fig. 1).

## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

### Cabeceo tensional (2/6)

Nos referiremos nosotros a otro tipo de situación que se produce con la misma disposición estructural pero cuando se afectan a macizos rocosos altamente fracturados y constituidos por rocas sanas o alteradas y en ocasiones degradables



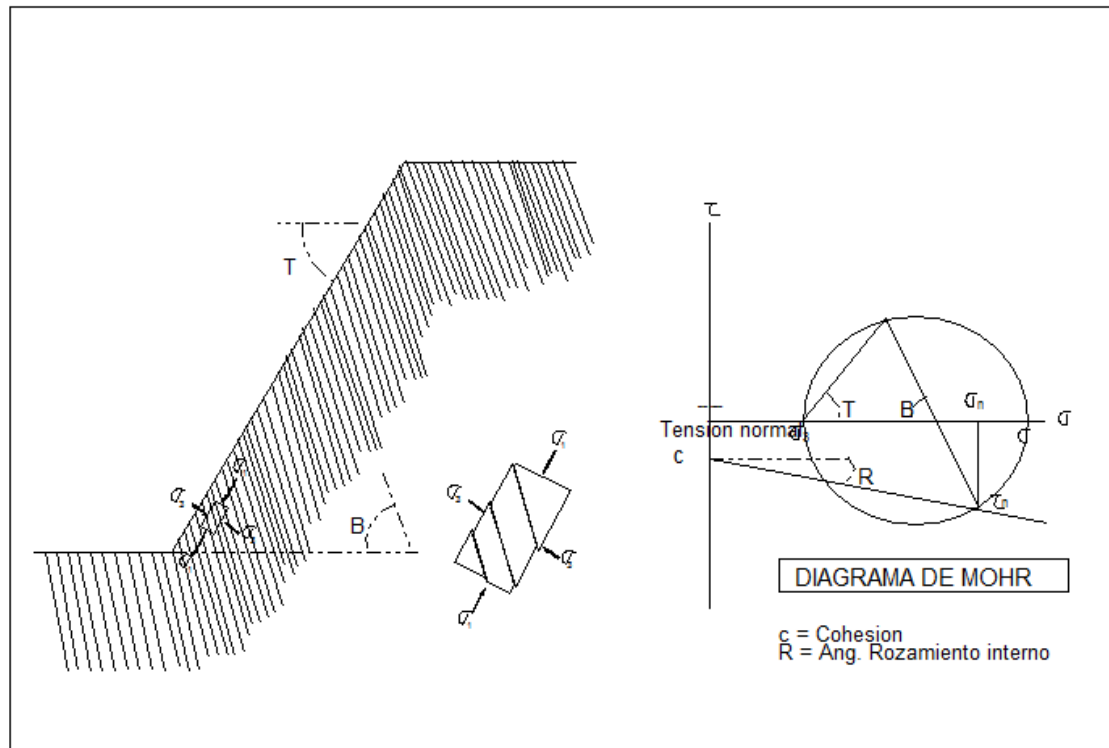
En estos casos se produce con la excavación un fenómeno que hemos dado en denominar "cabeceo tensional" que provoca:

1. Un reajuste tenso-deformacional tras la excavación y posteriormente.
2. Afección a la resistencia del macizo pudiendo llegar a provocar la rotura del talud.
3. El proceso se agrava por la acumulación del agua en el pie del talud de infiltración y de escorrentía.
4. El proceso se agrava por la concentración de tensiones en el pie del talud

## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

### Cabeceo tensional (3/6)

La justificación técnica del proceso se explica en la figura siguiente y tiene que ver con el fenómeno ya mencionado de la superación de la resistencia al corte en los planos de debilidad del macizo bajo el efecto de la sollicitación tensional que produce dicha excavación.

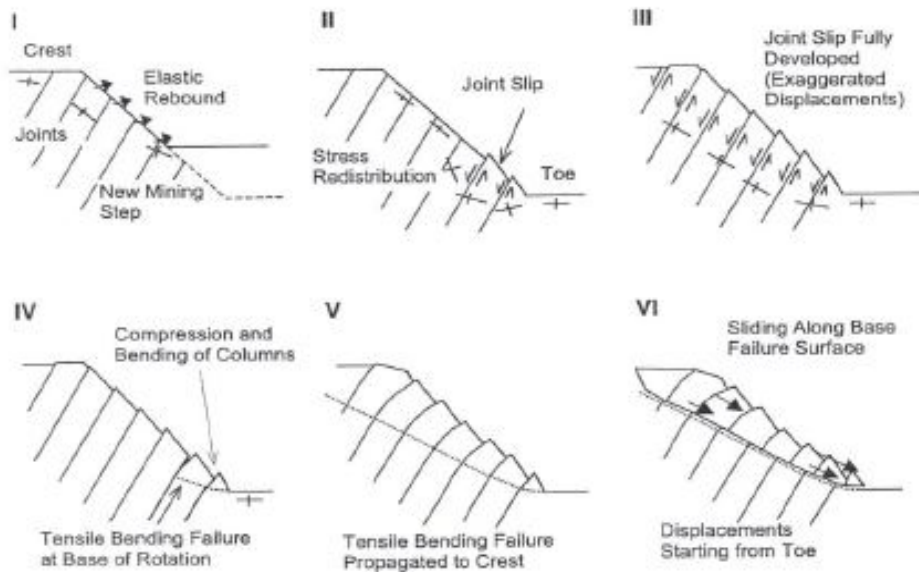


El problema se agrava en los taludes excavados al pie de laderas inclinadas:

1. Las tensiones se encuentran inicialmente con una orientación sensiblemente paralela a la ladera.
2. La zona de terreno afectado por la nueva excavación puede ser mucho mayor.
3. El terreno natural puede estar ya con el proceso ya iniciado

## 4. Disposición “al hilo” con buzamiento favorable. Cabeceo tensional (4/6)

El proceso se inicia con la aparición de **grietas con “salto inverso”** en el los labios, lo cual no es siempre correctamente interpretado.



**Figure 16: Failure stages for large-scale toppling failure in a slope (Sjoberg, 2000)**

El problema se agrava en los taludes excavados al pie de **laderas inclinadas**:

1. Las tensiones se encuentran inicialmente con una **orientación sensiblemente paralela a la ladera**.
2. La zona de terreno afectado por la nueva excavación puede ser **mucho mayor**.
3. El terreno natural puede estar ya con el **proceso ya iniciado**.
4. La aparición de **grietas con salto inverso**, favorece la infiltración del agua agravando el **proceso de deterioro** progresivo

El esquema anterior corresponde a un modelo de rotura a flexión de los estratos habitual para el análisis y cálculo de este tipo de situaciones, llevando a la definición de **refuerzos muy importante**.

## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable. Cabeceo tensional (5/6)

Lo más conveniente técnica y económicamente en estos casos, es analizar el **problema tensional** inicial y efectuar un **diseño geométrico del talud** que evite o minimice el grado de plastificación en la familia de discontinuidades principales del macizo.

El condicionante principal es la inclinación del talud respecto de la de las discontinuidades, siendo la más favorable, la disposición ortogonal y la pésima la que forma un ángulo de  $45-\phi/2$ .

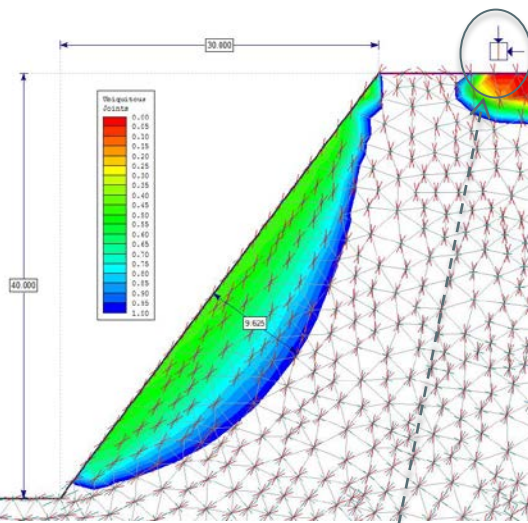
iCYFSA		ROTURA POR CABECEO TENSIONAL DE ESTRATOS						
OBRA:	DESMONTE 5 TRAMO 3							
Altura del talud:	10	20	30	40	50	60	70 m	
Densidad:	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5 T/m3	
Inclinación del Talud (V/H):	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
Angulo de inclinación:	56,3099	56,31	56,31	56,31	56,31	56,31	56,31	
Buzamiento de estratos:	60	60	60	60	60	60	60 °	
Cohesion en estratos:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00 T/m2	
Rozamiento en estratos:	25	25	25	25	25	25	25 °	
Coefficiente de minoración:	1	1	1	1	1	1	1	
Cohesión minorada:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00 T/m2	
Rozamiento minorado:	25	25	25	25	25	25	25 °	
Tensión principal menor (D3):	0	0	0	0	0	0	0 T/m2	
Constante para cálculo de D1:	3	3	3	3	3	3	3	
Tensión principal mayor (D1):	14,401	28,802	43,203	57,603	72,004	86,405	100,806 T/m2	
Tensión tangencial	-5,72165	-11,44	-17,16	-22,89	-28,61	-34,33	-40,052 T/m2	
Tensión normal	11,572	23,144	34,715	46,287	57,859	69,431	81,003 T/m2	
<b>Coefficiente de seguridad:</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	
Cohesión estricta:	0,326	0,651	0,977	1,302	1,628	1,954	2,279 T/m2	
Coefficiente de mayoración:	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Cohesión precisa	0,488	0,977	1,465	1,954	2,442	2,931	3,419 T/m2	
Diametro de bulones:	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00 mm	
Límite elástico:	4.100	4.100	4.100	4.100	4.100	4.100	4.100 kg/cm2	
Coefficiente de minoración:	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	
Resistencia al corte	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54 Tm/ud	
Resistencia a tracción:	18,30	18,30	18,30	18,30	18,30	18,30	18,30 Tm/ud	
<b>Bulones a cortante (m2/ud)</b>	<b>21,58</b>	<b>10,79</b>	<b>7,19</b>	<b>5,39</b>	<b>4,32</b>	<b>3,60</b>	<b>3,08</b>	
<b>Bulones activos (m2/ud)</b>								

Se pueden utilizar herramientas de cálculo simplificado para un análisis rápido del fenómeno, variando la altura y las inclinaciones del talud, obteniéndose los diferentes coeficientes de seguridad a fallo último en las discontinuidades

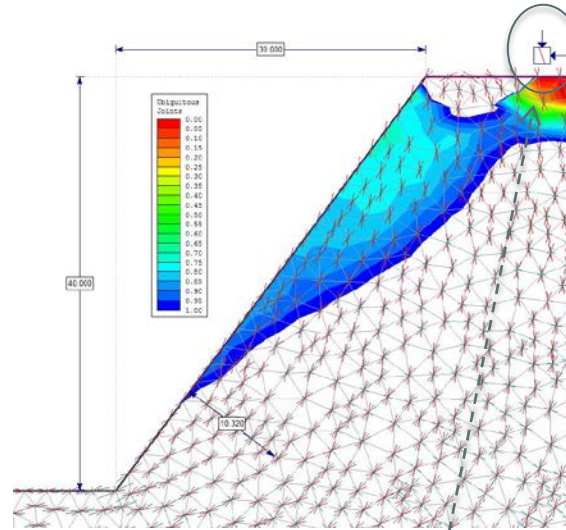
# 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

## Cabeceo tensional (6/6)

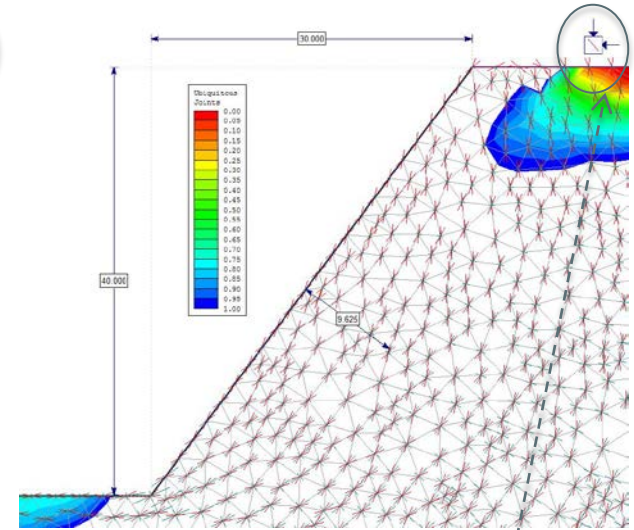
Finalmente se pueden utilizar modelos de elementos finitos (MEF) con la utilidad de las "juntas ubícuotas".



Buzamiento vertical de la junta ubícuota



Buzamiento intermedio de la junta ubícuota



Buzamiento óptimo de la junta ubícuota



## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

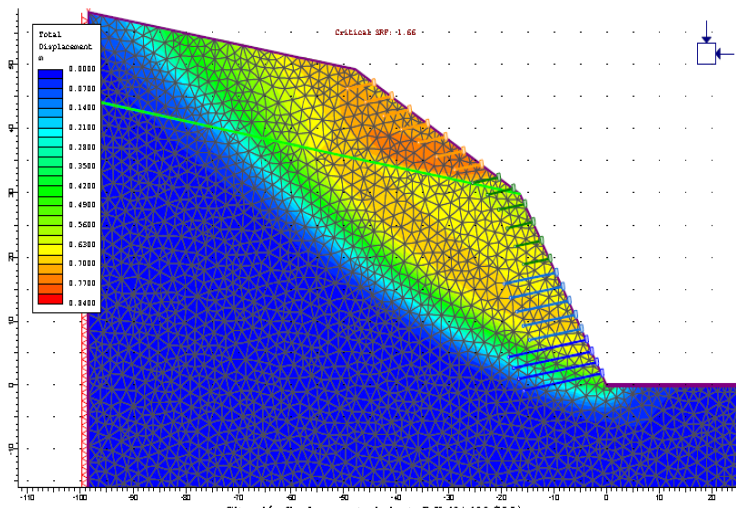
### Caso práctico de "cabeceo tensional" en talud ferroviario (1/4)

Se trata de un talud ferroviario de 50 m de altura total afectando dos materiales

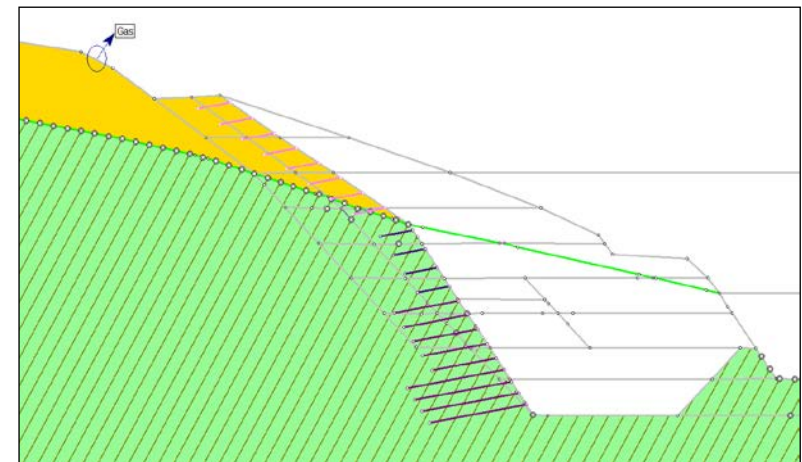
✓ Coluvión en los 10 metros superiores excavados al 2V/3H.

✓ El resto limolitas y pasadas de areniscas del Carbonífero areniscas excavados al 3V/2H.

Adicionalmente el talud disponía de un refuerzo importante a base de bulones de 5 a 15 m de longitud y espaciamiento entre dos y tres metros (ver figura), con un tratamiento superficial de cables, malla de triple torsión y malla antierosión.



Modelo de cálculo del proyecto FS=1,66

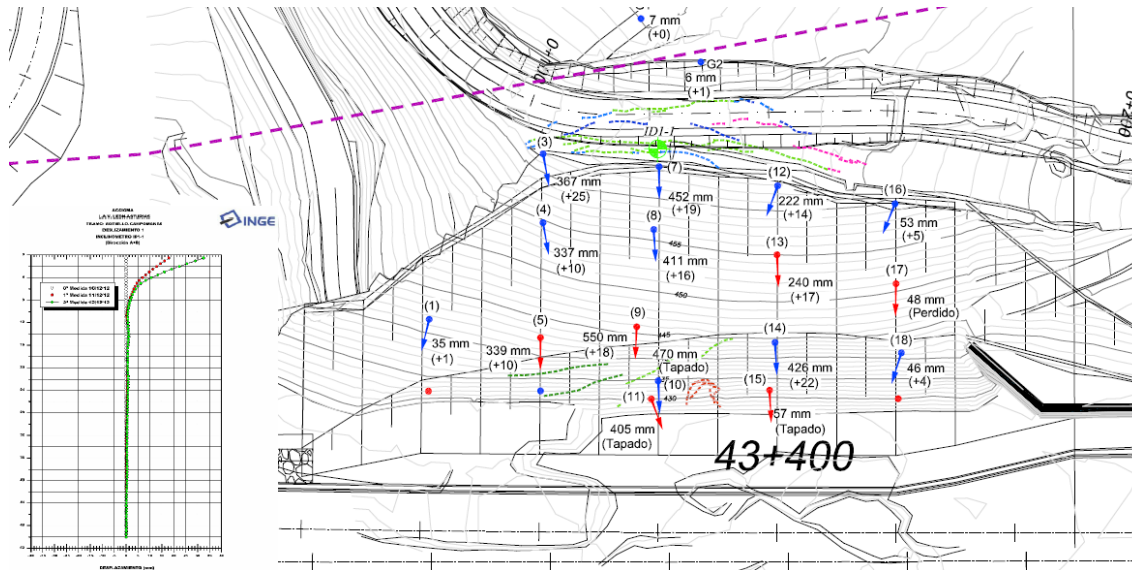


Modelo de cálculo del análisis posterior

# 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

## Caso práctico de "cabeceo tensional" en talud ferroviario (2/4)

A falta de 10 m de alcanzar la rasante comenzaron a detectarse una serie de movimientos que llevaron al adosado de un relleno estabilizador en el pie del talud para dar tiempo al análisis de la solución.



Levantamiento de grietas y control de movimientos .

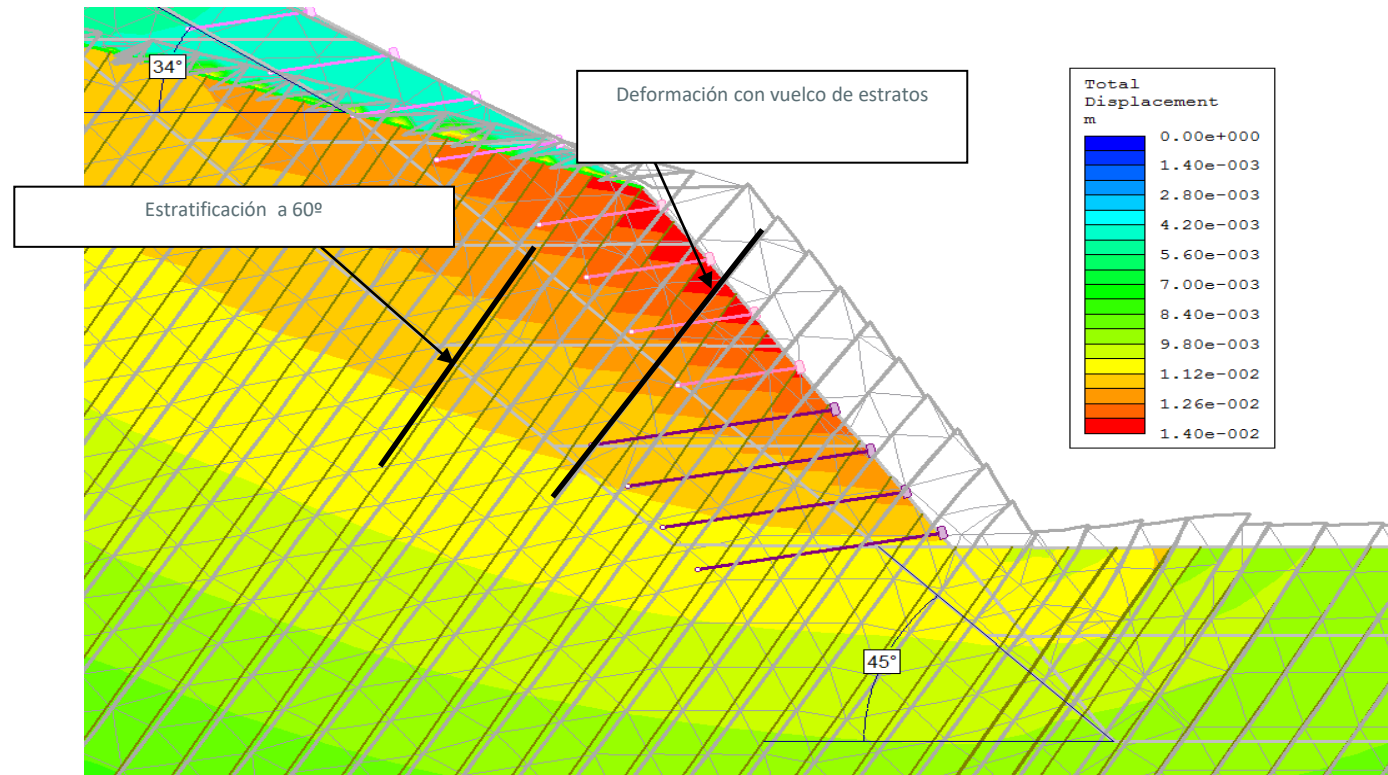
Dictamen: **FALLO ULTIMO DEL TALUD** a pesar del tacto del inclinómetro



## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

### Caso práctico de "cabeceo tensional" en talud ferroviario (3/4)

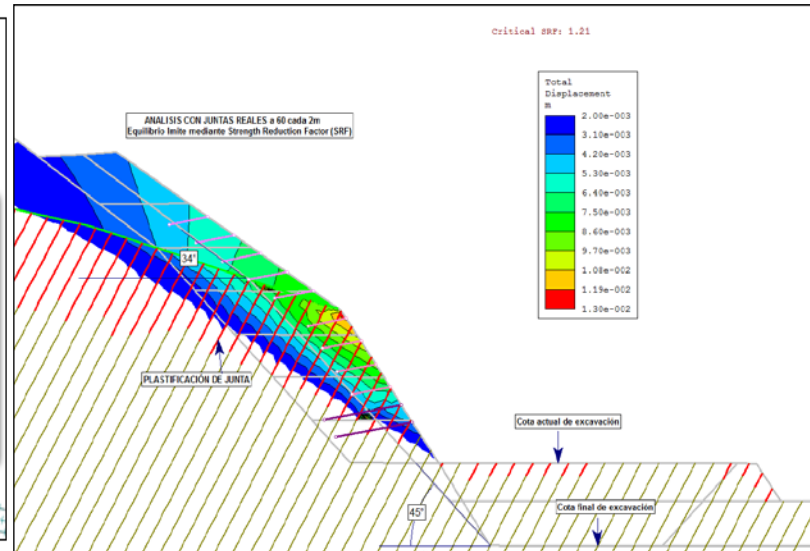
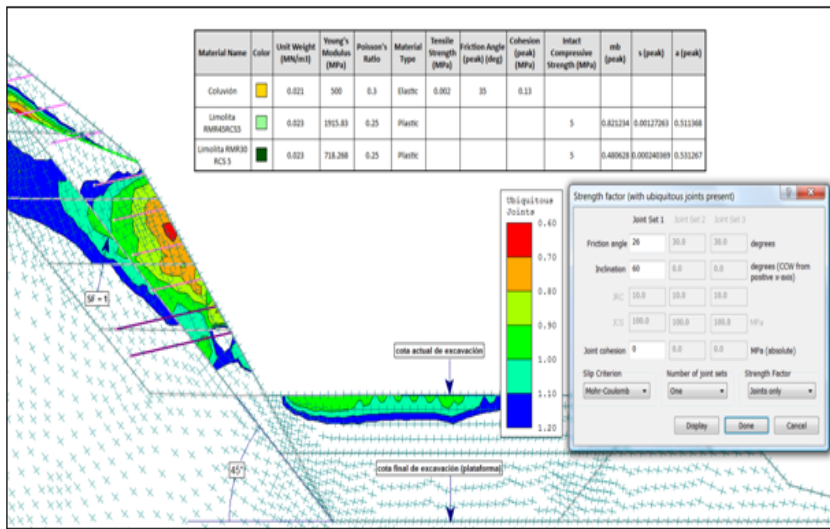
La interpretación final del fenómeno fue la de un proceso deformacional ligado al fenómeno de "cabeceo tensional" en la estratificación la cual se disponía sensiblemente orientada paralelamente al talud y con un buzamiento de 60° hacia el interior de la ladera.



# 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

## Caso práctico de "cabecero tensional" en talud ferroviario (4/4)

El problema se analizó detalladamente con modelos de elementos finitos sin consideración de las juntas inicialmente (juntas ubícuotas) y posteriormente representando las mismas en el modelo.



Se observa el fenómeno de la plastificación en la solución mediante la técnica de las "juntas ubícuotas". Se representan:

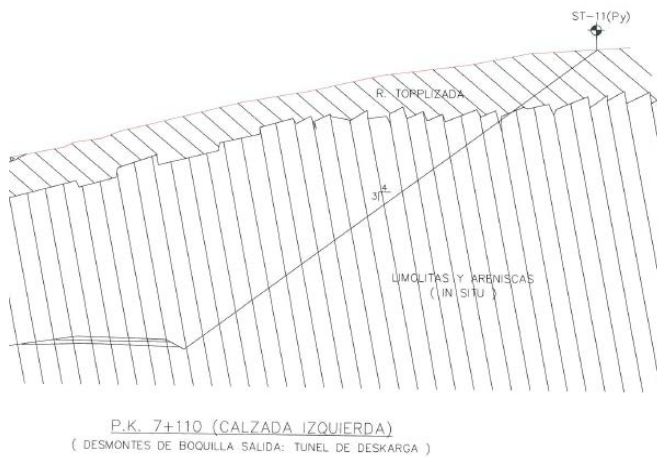
1. Orientación de las tensiones.
2. Zonas donde las juntas tendrían coeficientes de seguridad menores de 1,2

Se observan los desplazamientos del modelo que incluye las juntas en el momento de la construcción, así como las plastificaciones en las juntas de estratificación (resaltadas en rojo).

## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable. .

### Caso práctico de "cabeceo tensional" en talud carretero (1/3)

El caso corresponde a un talud importante (50 m) excavado en limolitas-lutitas y areniscas orientadas "al hilo" con un buzamiento de 65-70° hacia el interior, proyectado con una inclinación inicial suave (4H/3V; 37°).



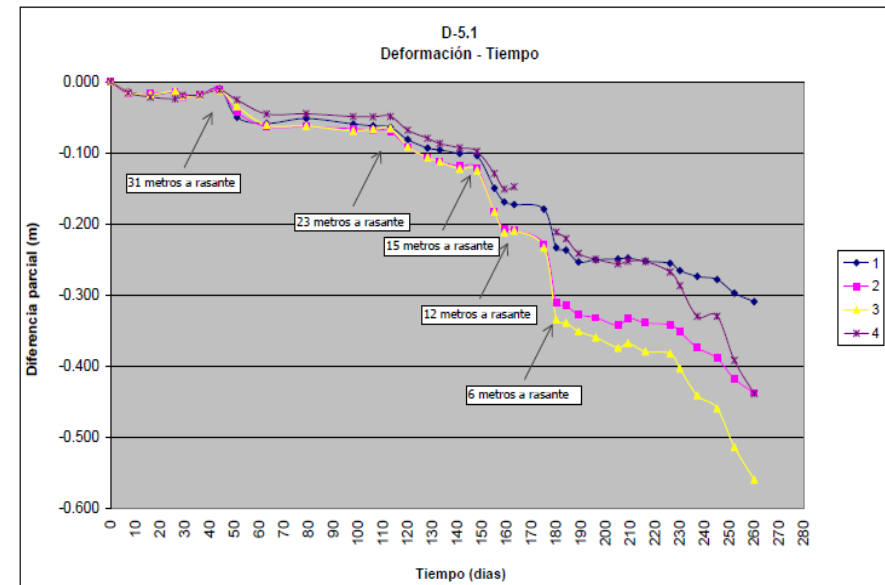
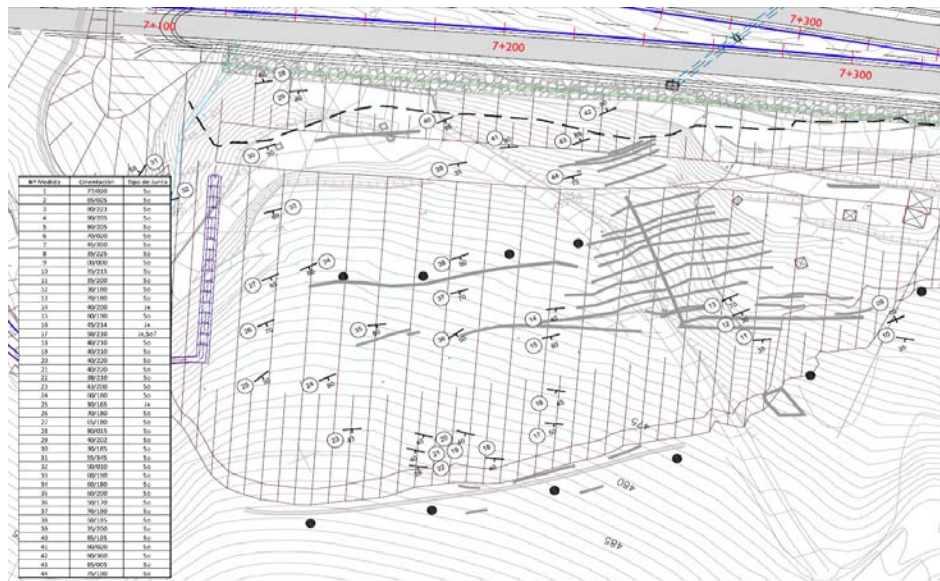
Perfil geológico interpretado en el proyecto con ladera volcada, comprobado durante la excavación.

Con una altura de talud de 23 m se apreciaron fenómenos de agrietamiento en el talud que llevaron a modificar la inclinación, pasando a 3H/2V (33°), y finalmente a 2H/1V (26,5°).

# 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

## Caso práctico de "cabecero tensional" en talud carretero (2/3)

El proceso último movimiento se refleja en los esquemas siguientes.



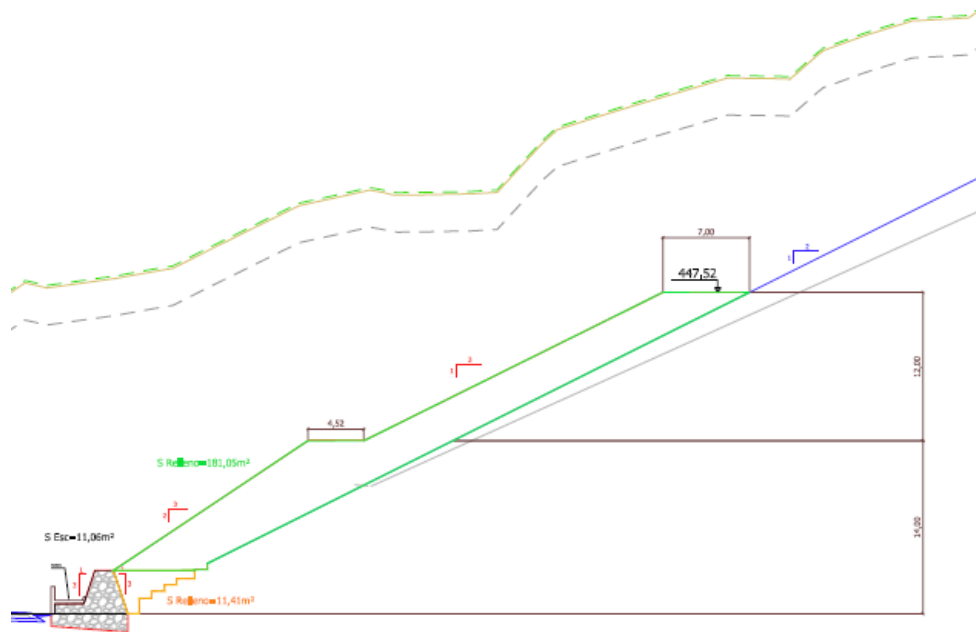
Control de movimientos y levantamiento de grietas.

Evolución de deformaciones. Se observa el deterioro progresivo del fenómeno

## 4. Disposición "al hilo" con buzamiento favorable.

### Caso práctico de "cabeceo tensional" en talud carretero (3/3)

La primera interpretación para el refuerzo del talud se asimiló a un fenómeno de rotura por fallo último del talud, definiéndose el anclaje de la ladera.



Posteriormente el fenómeno se analizó desde la óptica del fenómeno que hemos denominado como "cabeceo tensional", definiéndose una solución tendente al adosado de un relleno tendente a detener el proceso de cabeceo mediante la aportación de una carga adicional en la cara del talud.

Muchas gracias

---

