



TRABAJO FINAL DE GRADO

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA RESOLVER LAS FILTRACIONES EN LA CERRADA DE LA PRESA DE ALLOZ (NAVARRA)

ANEJO Nº5: ESTUDIO GEOTÉCNICO

Titulación: *Grado en Ingeniería Civil*

Curso académico: *2017/2018*

Autor: *Valentín Marín Dumitru*

Tutor: *Julio Garzón Roca*

Cotutor: *Francisco Javier Torrijo Echarri*

Valencia, Junio de 2018

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....5

1.1 OBJETO5

1.2 ALCANCE5

2. MARCO GEOLÓGICO5

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....5

2.2 GEOLOGÍA LOCAL5

3. ANÁLISIS DE LA LITOLOGÍA DEL EMPLAZAMIENTO6

4. TRABAJOS PREVIOS6

4.1 TRABAJOS DE CAMPO6

4.2 TRABAJOS DE LABORATORIO8

5. ANÁLISIS GEOTÉCNICO9

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS9

5.2. RESUMEN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS15

6. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES16

6.1. GENERALIDADES16

6.1 TALUD DE LA MARGEN DERECHA18

6.2 TALUD DE LA MARGEN IZQUIERDA19

7. MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD DE LA MARGEN IZQUIERDA20

7.1 GENERALIDADES20

7.2. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA20

7.3 REPLANTEO DE LOS ANCLAJES A DISPONER23

7.4 EJECUCIÓN DE LOS ANCLAJES.....23

8. CONCLUSIONES24

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS25

APÉNDICES

APÉNDICE I. ESTACIÓN GEOMECÁNICA

APÉNDICE II. PERFILES GEOTÉCNICOS

APÉNDICE III. CÁLCULO Y COMPROBACIONES DE LOS ANCLAJES

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO

El objeto del presente estudio es el análisis y la descripción geotécnica de la zona del emplazamiento de la presa de Alloz.

1.2 ALCANCE

El estudio comprende una breve descripción del marco geológico de la litología de los materiales que forman el subsuelo, una descripción de los trabajos de campo y laboratorio realizados, la caracterización geotécnica de cada material y la comprobación cinemática ante rotura de los taludes de las márgenes del embalse.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El embalse de Alloz, se encuentra situado en la vertiente meridional de la sierra de Andía, prácticamente donde enlazan el Terciario de la cuenca Alavesa con el de la cuenca del Ebro.

Dentro de este afloramiento Terciario destacan dos grandes isloes del Triásico, que han intruido diapíricamente una masa de arcillas abrigadas rojas, grises y verdes con abundancia de yeso y, en ocasiones, sales, dando origen al topónimo del Río Salado, donde se ubica el embalse de Alloz. Este Keuper se acompaña a menudos de “Jacintos de Compostela”, así como de carniolas y masas ofíticas.

Transversalmente al río, y en las inmediaciones de la cerrada aflora una pequeña faja Eocena de calizas, calizas margosas, margas y areniscas, junto a otra del Cretácico Superior compuesta por calizas, areniscas y margas arcillosas, que dan paso a una gran banda oligocena de margas, areniscas, yesos y conglomerados, que se extiende hacia el SE, bordeando los afloramientos Miocenos de la cuenca del Ebro.

2.2 GEOLOGÍA LOCAL

El vaso del embalse de Alloz lo constituyen esencialmente las margas y areniscas del Oligoceno-Aquitaniense que parece estar plegado en un gran sinclinal que hace aflorar las margas yesosas basales cerca de la cerrada y en la cola del embalse.

La presa de Alloz cierra la entalladura labrada por el Río Salado en un crestón de calizas eocenas, dispuestas transversalmente al mismo. Por la margen izquierda tienen una continuidad solo alterada por algún pequeño desplazamiento provocado por una falla, mientras que, en la zona próxima al collado de la margen derecha, sufren una fuerte flexión penetrando bajo el Keuper y el Oligoceno.

3. ANÁLISIS DE LA LITOLOGÍA DEL EMPLAZAMIENTO

Bajo la presa hay un paquete de calizas eocenas de 70 m de potencia y sus estratos buzan, con gran inclinación, hacia aguas arriba.

Dentro de él se pueden distinguir tres niveles: el tramo superior está constituido por un estrato de calizas de grano fino con algas, con potencia media de unos 30-40 metros.

El segundo tramo está constituido por calizas detríticas, y el tercero por calizas organógenas y detríticas; en ellas se localizan abundantes nummulites y alveolinas, así como un nivel conglomerático o brechoidal de 3 a 5 metros de espesor, formados por cantos calizos y algunos silíceo, generalmente redondeados, de diámetro mediano, con una matriz arcillosa.

Estratigráficamente situadas por debajo de las calizas eocenas y concordantes con ellas se encuentran unas margas del Cretácico de color gris a ocre, con algunas intercalaciones más calcáreas. Es de destacar, en el contacto con las calizas eocenas, la presencia del nivel brechoideo y que puede indicar la presencia de deslizamiento tectónico de las calizas sobre las margas.

En la margen izquierda, se puede observar claramente dos zonas: aguas arriba parece acuñarse hacia la ladera; en esta se presenta de forma resuelta y tonalidad rojiza, con bastantes yesos, destacando de las areniscas y margas, que en su contacto están falladas y desorganizadas. La más agua abajo ha sido detectada por los sondeos, pero en la zona tectonizada junto a la falla puede verse en superficie frecuentes inyecciones de material rojizo yesos a través de fracturas, de forma tal que es imposible su representación.

En la margen derecha se puede individualizar dos niveles areniscosos entre las margas, con una potencia aproximada del orden de unos 30-40 m. Se trata de una arenisca blanda con una dirección de estratificación sensiblemente Este-Oeste y unos buzamientos hacia el Norte del orden de 30-40°. La potencia del paquete con alteración de margas y areniscas es de unos 100-150 m, pasando gradualmente a margas con alguna intercalación areniscosa de mucha menos potencia, en su conjunto, que el anterior.

El Keuper, aflorante en Alloz se extiende radicalmente hacia el embalse con dirección NE cortando las margas, areniscas y margas yesíferas del Oligoceno, detectándose su presencia en el collado de la margen izquierda, sobre todo por la presencia de “Jacintos de Compostela” de tamaño milimétrico, lo cual explica que, durante mucho tiempo toda la formación yesosa, fuera atribuida al Oligoceno por no haberse detectado dichos minerales.

Haciendo hincapié al Keuper de la presa, podemos decir que tiene unas características similares a una de las series que menciona el autor Federico Ortí Cabo (1974) en su libro “El triásico superior de Levante”. La serie mencionada se trata de “arcillas yesíferas de Quesa” el autor la define como yesos con matriz arcillosa rojiza, de aspecto caótico, sin estratificación definida, con nódulos. Característicos los minerales autigénicos: grandes jacintos y aragonitos. Gran cantidad de venas de yeso fibroso blanco, de origen secundario, que cruzan el depósito en todas direcciones.

4. TRABAJOS PREVIOS

4.1 TRABAJOS DE CAMPO

Para la elaboración del siguiente estudio se cuenta con los datos de 4 sondeos mecánicos, 2 de ellos situados en la margen derecha de la presa (S-1 y S-2), uno de ellos aguas abajo de la cerrada de la presa (S-3), y el último de ellos en la margen izquierda (S-4).

Para la realización de los trabajos se empleó una máquina de rotación montada sobre camión con extracción continua de testigo, recogándose muestras para su posterior análisis en laboratorio. Dada la naturaleza del terreno y la presencia de agua freática, se empleó tubería de revestimiento en todos los sondeos realizados.

Los sondeos realizados en la margen derecha de la presa, presentan un diámetro de perforación de 76 mm, mientras que los testigos obtenidos son de 62 mm de diámetro. Por su parte, los sondeos S-3 y S-4 presentan un diámetro de perforación de 56 mm, mientras que el diámetro del testigo es de 42 mm.

Las muestras inalteradas que se han obtenido fueron parafinadas a fin preservar sus características, para posteriormente realizar los ensayos de laboratorio correspondientes.

En la siguiente tabla se muestran la localización de cada uno de los sondeos, así como la profundidad que se alcanzó.

Sondeo	Coordenadas	Profundidad
S-1	42º42'21.88"N 1º56'42.58"O	100 metros
S-2	42º42'19.84"N 1º56'41.59"O	61 metros
S-3	42º42'19.57"N 1º56'28.94"O	17 metros
S-4	42º42'21.64"N 1º56'27.33"O	50 metros

Tabla 1. Localización de los sondeos.

En el sondeo S-1 se ha realizado un ensayo de penetración estándar (SPT) empleando un tomamuestras bipartido según el procedimiento normalizado UNE EN ISO 22476-3. Este ensayo se ha realizado entre los 0,5 y 1 metros de profundidad.

En la siguiente imagen se observa la situación de cada uno de los sondeos realizados:



Figura 1. Localización de los sondeos. Fuente: Propia

Sondeo 1 (S-1)

Encontramos un nivel superficial aluvial de gravas con presencia de limos de un espesor medio de 2 metros. El ensayo de penetración estándar realizado arroja un valor de N_{SPT} igual a 50.

A continuación, se observa un nivel de margas con yesos de un espesor de 9 metros con una permeabilidad elevada debido a la disolución de los yesos presentes en la formación. Este tramo presenta un RQD de 70%, espaciamentos de aproximadamente 10 cm sin relleno y con paredes ligeramente rugosas, y una meteorización ligeramente apreciable.

Debajo de éste, encontramos un tramo de 22 metros de brechas y conglomerados del cual no se tiene información acerca del índice RQD.

Inmediatamente después, aparece un tramo de 48 metros de calizas con presencia de algas y nummulites. Se obtiene en este tramo un RQD de 87%, con espaciamentos entre diaclasas de unos 5 cm sin relleno aparente. Las paredes de las discontinuidades presentan cierta ondulación y el conjunto se encuentra en un estado de alteración considerable.

Por debajo de las calizas, aparece de nuevo un pequeño tramo de 7 metros de espesor de brechas y conglomerados de características similares a las anteriormente citadas.

Finalmente, el tramo restante de sondeo (11 metros) viene constituido por un nivel de margas ocre y grises con algún vestigio de roca caliza. Este tramo presenta un RQD de 79%, no presenta relleno entre sus discontinuidades, las cuales oscilan entre los 5 y 7 cm, y la rugosidad de sus paredes es elevada. Este tramo no presenta alteración visible.

Respecto al nivel freático, éste se encuentra a 5 metros de profundidad.

Sondeo 2 (S-2)

Encontramos en superficie un nivel de 11 metros de espesor de areniscas con yesos, seguido de un nivel de margas con yesos, el cual ocupa el resto del sondeo hasta alcanzar los 50 metros.

Las areniscas presentan un grado de fracturación muy elevado, por lo que no se ha podido extraer información respecto a este nivel. Por su parte, las margas con yesos presentan características muy similares a las extraídas del sondeo S-1, aunque éstas presentan un índice RQD de 74%.

Cabe destacar la presencia de oquedades considerables en este tramo debido a la disolución de los yesos, así como una gran permeabilidad.

El nivel freático se ha hallado a 5 metros de profundidad.

Sondeo 3 (S-3)

Este sondeo se ha realizado con una inclinación de 45° en dirección al cuerpo de presa, encontrando, en primer lugar, un nivel de 2 metros de gravas con presencia de limos.

Este primer nivel de gravas con limos presenta las mismas características que las expuestas en el sondeo S-1.

A continuación, aparece un nivel de 15 metros de espesor de margas ocre y grises con alternancia de calizas sin meteorización apreciable. Este tramo presenta un RQD de 77%, no presenta relleno entre sus discontinuidades, las cuales rondan los 5 cm, y la rugosidad de sus paredes es elevada.

Finalmente, aparece un nivel de 20 metros de espesor de calizas con restos de algas y nummulites con un RQD de 85%.

Todo el tramo se encuentra bajo el nivel freático.

Sondeo 4

Se ha realizado el sondeo con una inclinación de 45° encontrando, en primer lugar, un nivel de calizas con restos de algas y nummulites con un espesor de 40 metros.

Seguidamente, aparecen margas con yesos en un tramo de 10 metros.

El nivel freático se halla a una profundidad de 6 metros.

Estación geomecánica

Además, se ha llevado a cabo una estación geomecánica junto al estribo derecho de la presa a fin de caracterizar las discontinuidades del macizo. En la siguiente tabla se muestran los valores medios obtenidos de la dirección de buzamiento y buzamiento de la familia de diaclasas y de los planos de estratificación presentes en el macizo.

Sistema	Dirección de buzamiento (°)	Buzamiento (°)
J1	161	89
J2	260	89
J3	61	64
J4	171	50
S0	341	67

Tabla 2.Discontinuidades del macizo rocoso

La localización de la estación geomecánica es: 42º42’19.55’’N 1º56’33.41’’O

Los datos plasmados en la tabla anterior se utilizarán más adelante para el análisis de estabilidad de taludes.

4.2 TRABAJOS DE LABORATORIO

Durante la realización de los sondeos, se procedió a la toma de muestras inalteradas, a fin de conocer las características geotécnicas de los materiales.

A la vista de las mismas, y del objetivo de este trabajo, se decidió realizar los ensayos siguientes, según las normas UNE en vigor:

Sondeo	Ensayo	Cantidad	Norma
S-1	Densidad	5	(UNE 103.301-94)
	Compresión simple	4	(UNE 22950-1:1990)
S-2	Densidad	1	(UNE 103.301-94)
	Compresión simple	1	(UNE 22950-1:1990)
S-3	Densidad	2	(UNE 103.301-94)
	Compresión simple	2	(UNE 22950-1:1990)
S-4	Densidad	1	(UNE 103.301-94)
	Compresión simple	2	(UNE 22950-1:1990)

Tabla 3. Ensayos realizados

Los resultados de los ensayos anteriores quedan recogidos en la siguiente tabla:

ENSAYO DE DENSIDAD			
SONDEO	PROFUNDIDAD	LITOLOGÍA	RESULTADO
S-1	0,5 metros	Gravas con limos	18 kN/m³
S-1	6 metros	Margas con yesos	24 kN/m³
S-1	20 metros	Brechas y conglomerados	26 kN/m³
S-1	50 metros	Calizas	23 kN/m³
S-1	94 metros	Margas con calizas	24 kN/m³
S-2	35 metros	Margas con yesos	24 kN/m³
S-3	1,2 metros	Gravas con limos	22 kN/m³
S-3	13 metros	Margas con calizas	26 kN/m³
S-4	45 metros	Margas con yesos	26 kN/m³

Tabla 4. Ensayos de densidad

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE			
SONDEO	PROFUNDIDAD	LITOLOGÍA	RESULTADO
S-1	6 metros	Margas con yesos	15 MPa
S-1	20 metros	Brechas y conglomerados	30,6 MPa
S-1	50 metros	Calizas	110 MPa
S-1	94 metros	Margas con calizas	17 MPa
S-2	35 metros	Margas con yesos	15 MPa
S-3	13 metros	Margas con calizas	17 MPa
S-3	30 metros	Calizas	110 MPa
S-4	20 metros	Calizas	105 MPa
S-4	45 metros	Margas con yesos	15 MPa

Tabla 5. Ensayos de resistencia a compresión simple

5. ANÁLISIS GEOTÉCNICO

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio se reconoce un terreno constituido fundamentalmente por cinco unidades geotécnicas:

- Gravas limosas
- Margas yesosas
- Brechas y conglomerados
- Calizas
- Margas con calizas

A continuación, se describen cada una de estas unidades geotécnicas.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS

Gravas limosas (Unidad Geotécnica 1)

Se trata de un nivel superficial aluvial de gravas con presencia de limos de un espesor medio de 2 metros.

Los valores de peso específico, en un total de 2 muestras ensayadas, varían entre 18 kN/m³ y 22 kN/m³, tomando como valor medio un peso específico de 20 kN/m³.

En los sondeos S-1 y S-3 se han realizado ensayos SPT en los cuales el número de golpes ha sido, respectivamente, 50 y 54, tomando un valor medio de N_{SPT} igual a 52.

A partir de este valor, se han empleado las siguientes correlaciones a fin de obtener los valores de la cohesión, ángulo de rozamiento interno y módulo de elasticidad.

Para obtener el valor del ángulo de rozamiento interno, se emplea la formulación propuesta por Muromachi (1974):

∅ = 20 + 3,5 · √N

La cual nos da un valor de 45,2°.

En cuanto al módulo de deformación se emplea la formulación propuesta por Wrench and Nowatzki (1986):

E = 2,22 · N^{0,888}

La cual nos da un valor de 74,16 MPa.

Margas yesosas (Unidad Geotécnica 2)

Consiste en un nivel de margas con yesos de un espesor variable de entre 9 y 10 metros con una permeabilidad elevada debido a la disolución de los yesos presentes en la formación.

En el ensayo realizado de resistencia a compresión simple se ha obtenido un valor de 15 MPa. En cuanto a los resultados del ensayo de densidad se toma como valor medio 25 kN/m³

Por su parte, el valor de RQD obtenido del sondeo S-1 es del 70 % mientras que en el sondeo S-2 se obtiene un valor de 74%, tomando como valor medio un RQD de 72%.

A partir del RQD y de los resultados de la estación geomecánica se procede a estimar el valor del índice RMR. Dicho índice, desarrollado por Bieniawski en 1973, consiste en un sistema de clasificación del macizo rocoso que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos. Para su obtención se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.

Una vez obtenido el valor de RMR se clasifica el macizo del siguiente modo en función del mismo:

Clase	Calidad	RMR
I	Muy buena	100 – 81
II	Buena	80 – 61
III	Media	60 – 41
IV	Mala	40 – 21
V	Muy mala	< 20

Tabla 6. Valores de RMR

En la siguiente tabla se muestran los valores asignados a cada parámetro para el cálculo del índice RMR, así como el valor total obtenido del mismo.

Parámetro		Puntuación
Resistencia de la matriz rocosa	15 MPa	2
RQD	72%	13
Separación entre diaclasas	0,1 m	8
Longitud de las discontinuidades	2 m	4
Abertura	2 mm	1
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Ligeramente alterada	5
Agua freática	12 l/s	7

Total	49
-------	----

Tabla 7. RMR de la Unidad Geotécnica 2

Se puede concluir que la calidad de la roca en base a la clasificación de Bieniawski empleando el índice RMR es media, de clase III.

A fin de establecer los parámetros de resistencia y deformabilidad se emplea el criterio de rotura de Hoek-Brown de 2002. Para ello, se debe establecer el índice GSI, el parámetro m_i y el parámetro D, los cuales vienen definidos del siguiente modo:

Índice GSI

El índice de resistencia geológica (GSI) fue desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown.

Este índice de calidad geotécnica se determina en base a la estructura del macizo rocosos y de la condición de la estructura presentes en el mismo, tal y como se muestra en la siguiente tabla en la que se ingresa desde 2 puntos diferentes: el horizontal, referente al tamaño y el contacto entre bloques, composición y estructura; y el vertical referente a las condiciones de las discontinuidades. Se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales.

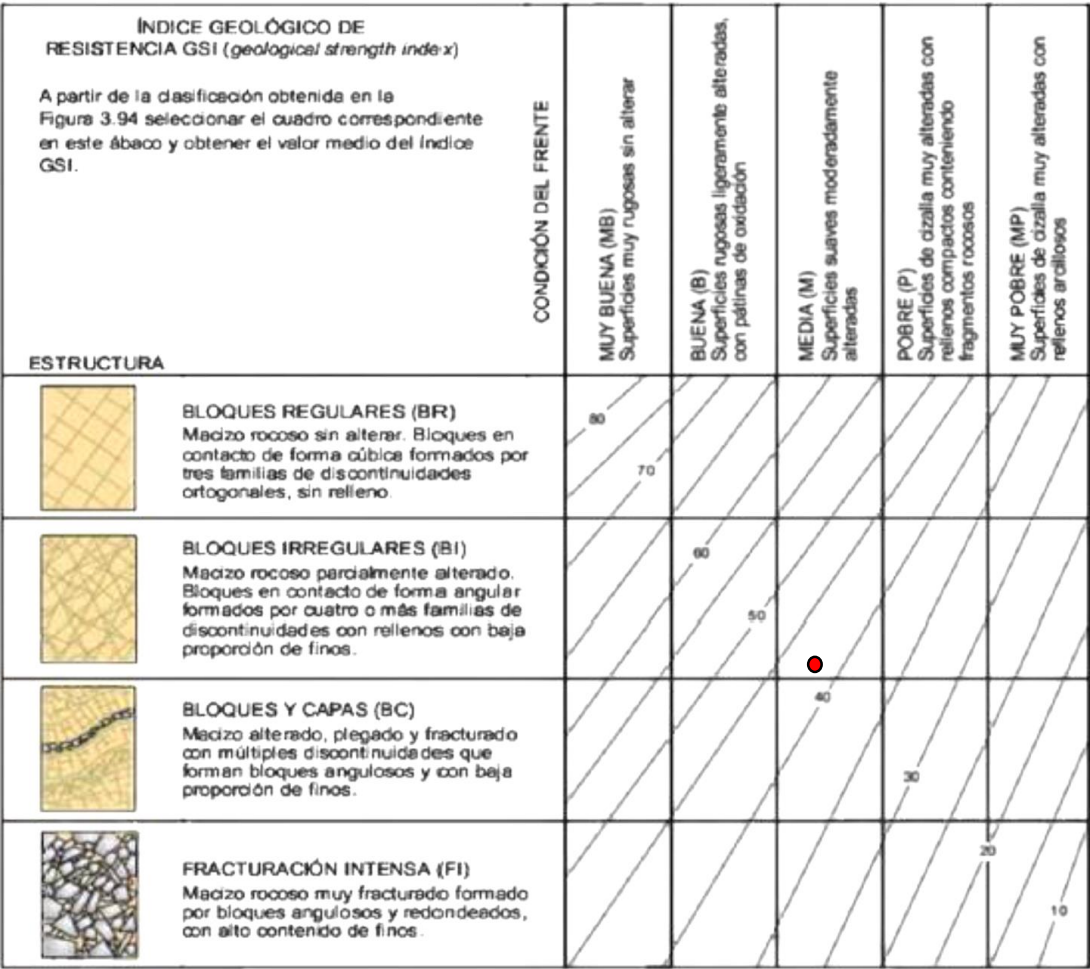


Figura 2. Índice GSI

Se escoge un valor de GSI igual a 44, tal y como aparece indicado en la Figura 2.

Parámetro m_i

Para la determinación del parámetro m_i podemos seguir el criterio de Hoek representado en la siguiente tabla, en la que según el tipo de roca (sedimentaria, ígnea o metamórfica), su clase y grupo y su textura obtenemos diferentes valores para m_i .

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
			←----- Grauwaca (18) -----→			
	No Clásticas	Orgánicas	←----- Creta 7 -----→			
			←----- Carbón (8 – 21) -----→			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
	Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13		
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 – 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
		Oscuras	Diorita (28)		Andesita 19	
			Gabbro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)	
			Norita 22			
Extrusivas Piroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)		

Figura 3. Parámetro m_i

Se escoge un valor de m_i igual a 7.

Parámetro D

Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como aquellos esfuerzos que aparezcan en la excavación provocan una alteración del macizo rocoso. Esta alteración es medida con el índice D que varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

En nuestro caso, tomaremos un valor de $D = 0,7$ debido a que se va a llevar a cabo voladuras en taludes de forma controlada.

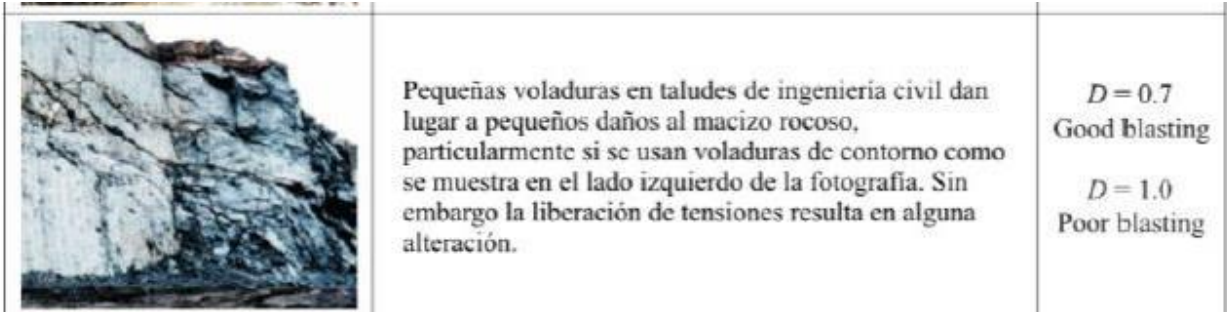


Figura 4. Parámetro D

Una vez obtenidos los parámetros de Hoek y Brown, pueden calcularse los valores de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno del macizo rocoso ya que existe una relación para un determinado nivel de presión de confinamiento, la curva de resistencia intrínseca envolvente de los estados tensionales últimos definidos por el criterio de rotura, puede sustituirse por una recta definida por el ángulo de rozamiento y la cohesión. Para la realización de estas estimaciones se ha utilizado el programa RocLab, de la compañía Rocscience Inc.

El RocLab es un programa de computación que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso de acuerdo con el criterio de rotura Generalizado de Hoek-Brown. Para su correcto funcionamiento, en primer lugar, se determinan los parámetros de resistencia generalizados de Hoek-Brown (m_b , 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 **m_i**
- El índice de resistencia geológica **GSI**
- El factor de perturbación **D**

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

Una vez tengamos claros los datos que hay que meter en el programa y la manera de hacerlo, se introducen estos y nos saldrá una ventana con todos los resultados que más adelante se observan en las unidades litológicas.

Hoek (1983, 1994) y Hoek et al. (2002) proponen el siguiente criterio generalizado de resistencia intrínseca para macizos rocosos:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left[m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a$$

Siendo:

- m_b : valor reducido del parámetro de resistencia intrínseca de la roca intacta m_i .
- σ'_1 : tensión efectiva principal mayor.
- σ'_3 : tensión efectiva principal menor.

- σ_{ci} : resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- a y s : parámetros de resistencia intrínseca del macizo rocoso.

La estimación de m_b , a y s puede realizarse a partir del “Geological Strength Index” (GSI) según las propuestas de Hoek (1994) y Hoek et al (1992, 1995 y 2002), basadas en las Priest y Brown (1983):

$$m_b = m_i \cdot e^{\left[\frac{GSI-100}{28-14D}\right]}$$
$$a = 0,5 + \left[\frac{1}{6} \cdot \left(e^{\left[\frac{-GSI}{15}\right]} - e^{\left[\frac{-20}{3}\right]}\right)\right]$$
$$s = e^{\left[\frac{GSI-100}{9-3D}\right]}$$

- Siendo:
- m_i : el parámetro de resistencia intrínseca de la roca intacta deducido de ensayos triaxiales o de las referencias bibliográficas publicadas por Hoek (1983, 1995 y 2000).
 - D : factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso durante su excavación.

Introduciendo el valor del GSI así como de los parámetros m_i y D indicados antes, se obtienen las siguientes propiedades tenso-deformacionales del macizo rocoso:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0,014$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 0,242$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 1,097$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 781,3$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso:

- Cohesión = 0,398 MPa.
- Ángulo de rozamiento interno = 18°.

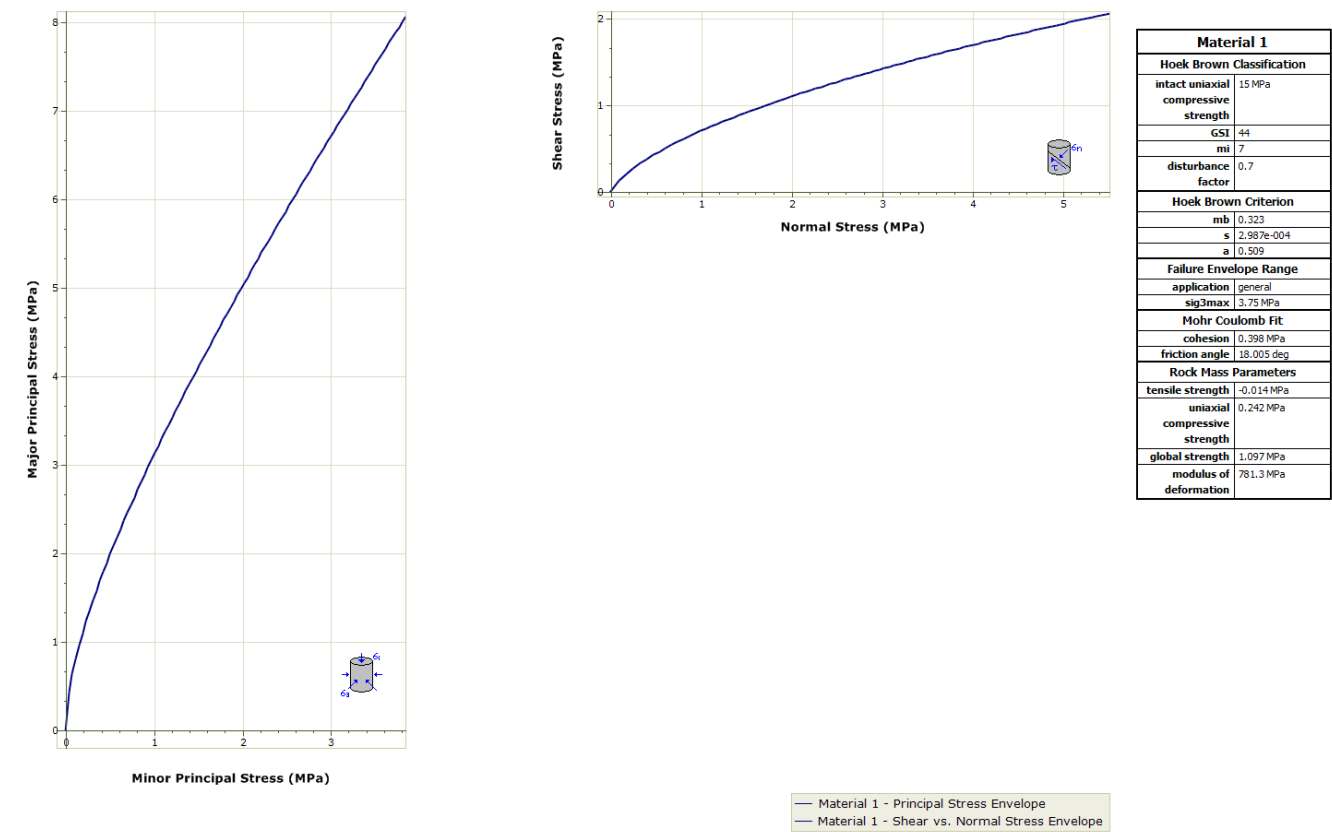


Figura 5. Criterio de rotura de Hoek Brown para la U.G.2

Brechas y conglomerados (Unidad Geotécnica 3)

Consiste en un nivel de espesor que varía entre 7 y 22 metros, formado por una serie de gravas litificadas constituidas tanto por clastos redondeados como angulosos.

Del ensayo realizado para obtener el peso específico se ha obtenido un valor de 26 kN/m³.

El valor de la resistencia a compresión simple del ensayo realizado es de 30,6 MPa.

Aplicando el criterio de Hoek-Brown con los siguientes parámetros:

- GSI = 60
- $m_i = 20$
- $D = 0,7$

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>)		CONDICIÓN DEL FRENTE				
A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.						
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

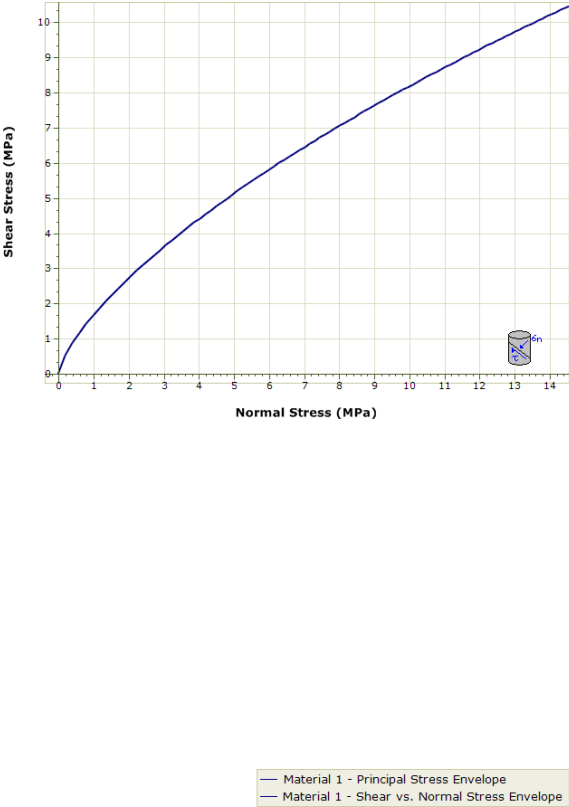
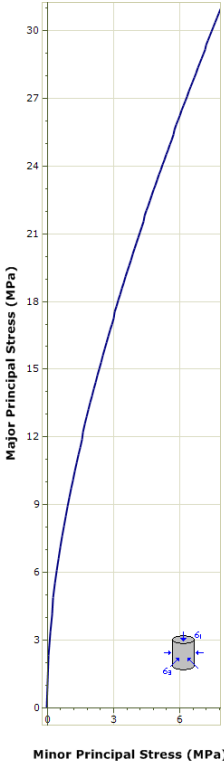
Figura 6. Índice GSI

Introduciendo el valor del GSI así como de los parámetros m_i y D indicados, se obtienen las siguientes propiedades tenso-deformacionales del macizo rocoso:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0,042$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 1,659$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 6,134$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 3218,938$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso:

- Cohesión = 1,668 MPa.
- Ángulo de rozamiento interno = 33°.



Material 1	
Hoek Brown Classification	
intact uniaxial compressive strength	30.6 MPa
GSI	60
m_i	20
disturbance factor	0.7
Hoek Brown Criterion	
m_b	2.221
s	0.003
a	0.503
Failure Envelope Range	
application	general
σ_{3max}	7.65 MPa
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	1.668 MPa
friction angle	32.916 deg
Rock Mass Parameters	
tensile strength	-0.042 MPa
uniaxial compressive strength	1.659 MPa
global strength	6.134 MPa
modulus of deformation	3218.938 MPa

Figura 7. Criterio de rotura de Hoek Brown para la U.G.3

Calizas (Unidad Geotécnica 4)

Se trata de un nivel de calizas con presencia de algas y numulites cuyo espesor varía entre 20 y 48 metros.

Del ensayo de densidad realizado, se ha obtenido un valor de 23 kN/m³.

Asimismo, del ensayo de resistencia a compresión simple se ha obtenido un valor de 110 MPa.

Por su parte, el valor de RQD obtenido del sondeo S-1 es del 87%, en el sondeo S-3 se obtiene un valor de 85%, mientras que en el sondeo S-4 se obtiene un valor de 84%, tomando como valor medio 86%.

A partir del RQD y de los resultados de la estación geomecánica se procede a estimar el valor del índice RMR. Los valores asignados a cada parámetro para el cálculo del índice RMR se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro		Puntuación
Resistencia de la matriz rocosa	110 MPa	12
RQD	86%	17
Separación entre diaclasas	0,1 m	8
Longitud de las discontinuidades	0.9 m	6
Abertura	1 mm	1
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Ligeramente alterada	5
Agua freática	12 l/s	7
Total		65

Tabla 8. RMR de la Unidad Geotécnica 4

Una vez obtenido el valor, se puede decir que la calidad de la roca en base a la clasificación de Bieniawski empleando el índice RMR es buena, de clase II.

Aplicando el criterio de Hoek-Brown con los siguientes parámetros:

- GSI = 60
- $m_i = 4$
- $D = 0,7$

Se obtienen los siguientes parámetros tenso-deformacionales del macizo:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0,752$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 5,962$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 10,55$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 3218,938$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso:

- Cohesión = 3,686 MPa.
- Ángulo de rozamiento interno = 20°.

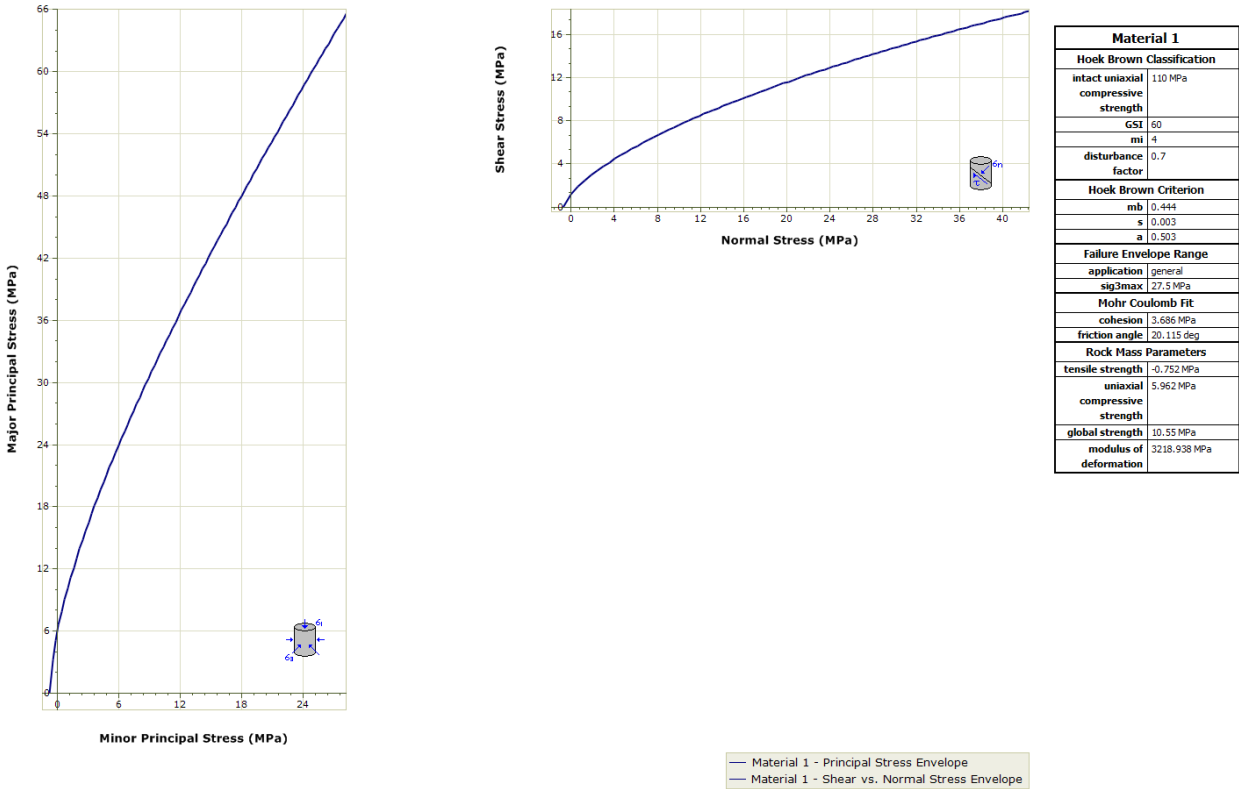


Figura 8. Criterio de rotura de Hoek Brown para la U.G.4

Margas con calizas (Unidad Geotécnica 5)

Consiste en un nivel de margas ocres y grises con algún vestigio de roca caliza con un espesor que varía entre 11 y 15 metros.

En el ensayo realizado de resistencia a compresión simple, se ha obtenido un valor de 17 MPa.

Respecto a los resultados del ensayo de densidad se toma un valor medio de peso específico de 25 kN/m³.

Por su parte, el valor de RQD obtenido del sondeo S-1 es del 79 % mientras que en el sondeo S-3 se obtiene un valor de 77%, tomando como valor medio 78%.

A partir del RQD y de los resultados de la estación geomecánica se procede a estimar el valor del índice RMR. Para dicho cálculo se procede a asignados a cada parámetro para el cálculo del índice RMR se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro		Puntuación
Resistencia de la matriz rocosa	17 MPa	2
RQD	79%	17
Separación entre diaclasas	0,15 m	8
Longitud de las discontinuidades	1,5 m	4
Abertura	2 mm	1
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Ligeramente alterada	5
Agua freática	12 l/s	7
Total		53

Tabla 9. RMR de la Unidad Geotécnica 5

Tras obtener el valor, se puede aducir que la calidad de la roca en base a la clasificación de Bieniawski empleando el índice RMR es media, de clase III.

Aplicando el criterio de Hoek-Brown con los siguientes parámetros:

- GSI = 48
- $m_i = 7$
- $D = 0,7$

Se obtienen los siguientes parámetros tenso-deformacionales del macizo:

- Resistencia a tracción del macizo rocoso: $\sigma_T = -0,023$ MPa.
- Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso: $\sigma_c = 0,374$ MPa.
- Resistencia a compresión global del macizo rocoso: $\sigma_{cm} = 1,414$ MPa.
- Módulo de deformación del macizo rocoso: $E_m = 1118,046$ MPa.

También se obtienen los parámetros de resistencia al corte para el macizo rocoso:

- Cohesión = 0,499 MPa.
- Ángulo de rozamiento interno = 19,5°.

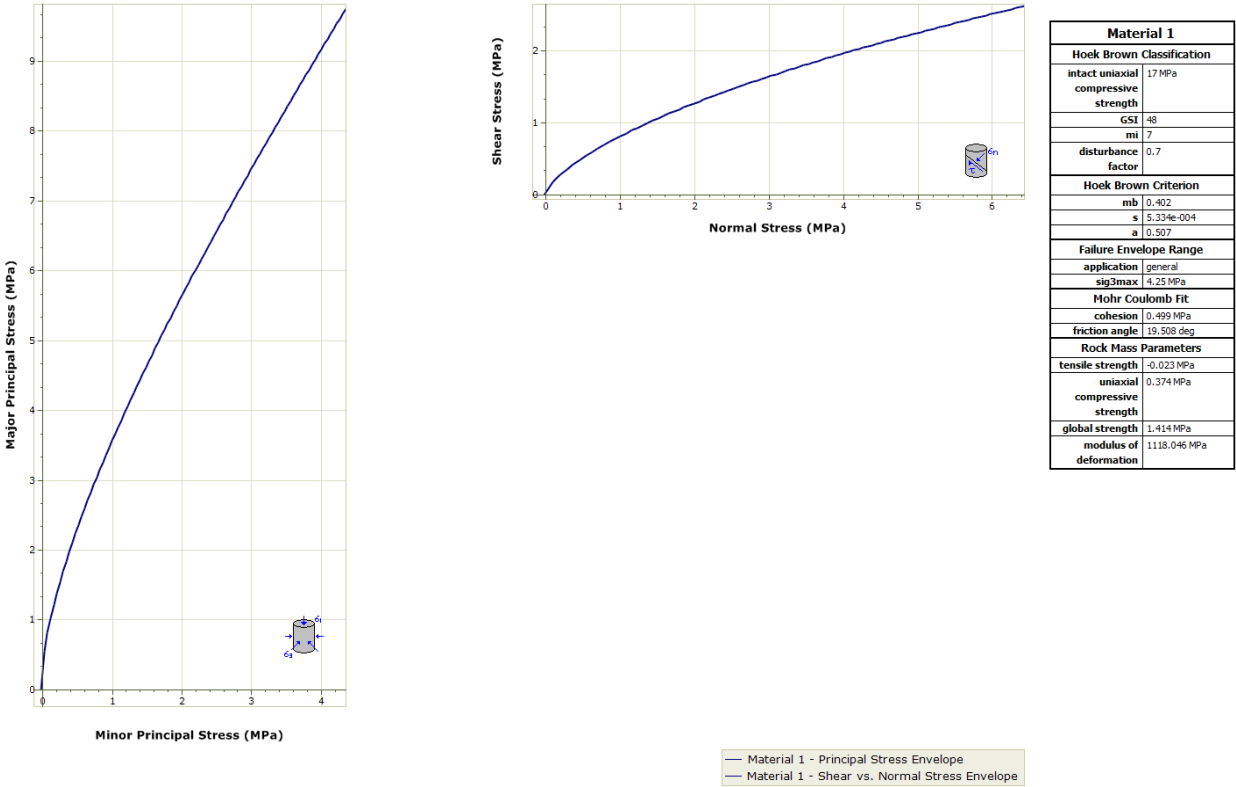


Figura 9. Criterio de rotura de Hoek Brown para la U.G.5

5.2. RESUMEN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

A partir de las características de las unidades geotécnicas definidas, se obtiene la siguiente tabla resumen de sus valores.

	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E (MPa)	c (MPa)	Φ (°)	RCS (MPa)	γ (kN/m³)	RMR	GSI
U.G.1	-	-	-	74,16	-	45,2	-	20	-	-
U.G.2	- 0,014	0,242	1,097	781,30	0,398	18,0	15,0	25	49	44
U.G.3	- 0,042	1,659	6,134	3218,94	1,670	33,0	30,6	26	-	60
U.G.4	- 0,752	5,962	10,55	3218, 94	3,690	20,0	110,0	23	65	60
U.G.5	- 0,023	0,374	1,414	1118,05	0,499	19,5	17,0	25	53	48

Tabla 10. Resumen de parámetros geotécnicos

En el Apéndice II se pueden observar los perfiles geotécnicos elaborados en base a los parámetros estimados.

6. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

6.1. GENERALIDADES

A continuación, se va a llevar a cabo el análisis cinemático por medio de proyección estereográfica ante rotura plana, rotura por vuelco o toppling y rotura en cuña de los taludes de las laderas de la margen derecha e izquierda. Para la realización de estas comprobaciones se ha utilizado el programa Dips, de la compañía Rocscience Inc.

Dips es un programa diseñado para realizar análisis y visualizar información estructural de igual modo que si usáramos una red estereográfica.

- Los datos a introducir son los siguiente:
- Buzamiento (dip) de todas las familias de diaclasado.
 - Dirección de buzamiento (dip direction) de todas las familias de diaclasado.
 - Angulo de rozamiento del macizo (friction angle).
 - Angulo del talud (slope angle).

Una vez ingresados los datos se obtiene una ventana con el círculo estereográfico y los resultados, como se observa más adelante.

En las siguientes imágenes se muestran las 4 familias de diaclasas existentes en el macizo (J1, J2, J3 y J4) junto con el plano de estratificación (S0). En la primera imagen se observan los planos junto a las concentraciones de densidades de polos de estos planos. En la segunda imagen se han agrupado las 4 familias junto con el plano de estratificación en 5 planos.

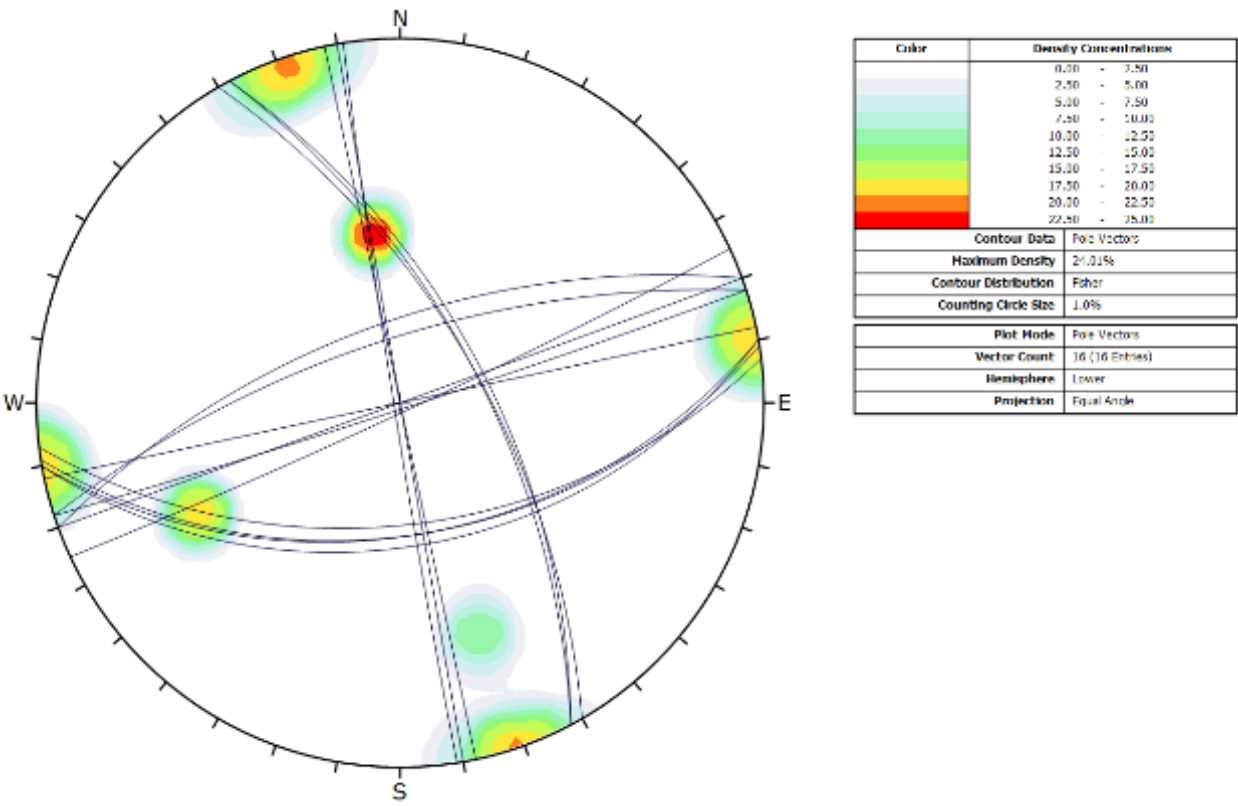


Figura 10. Discontinuidades del macizo

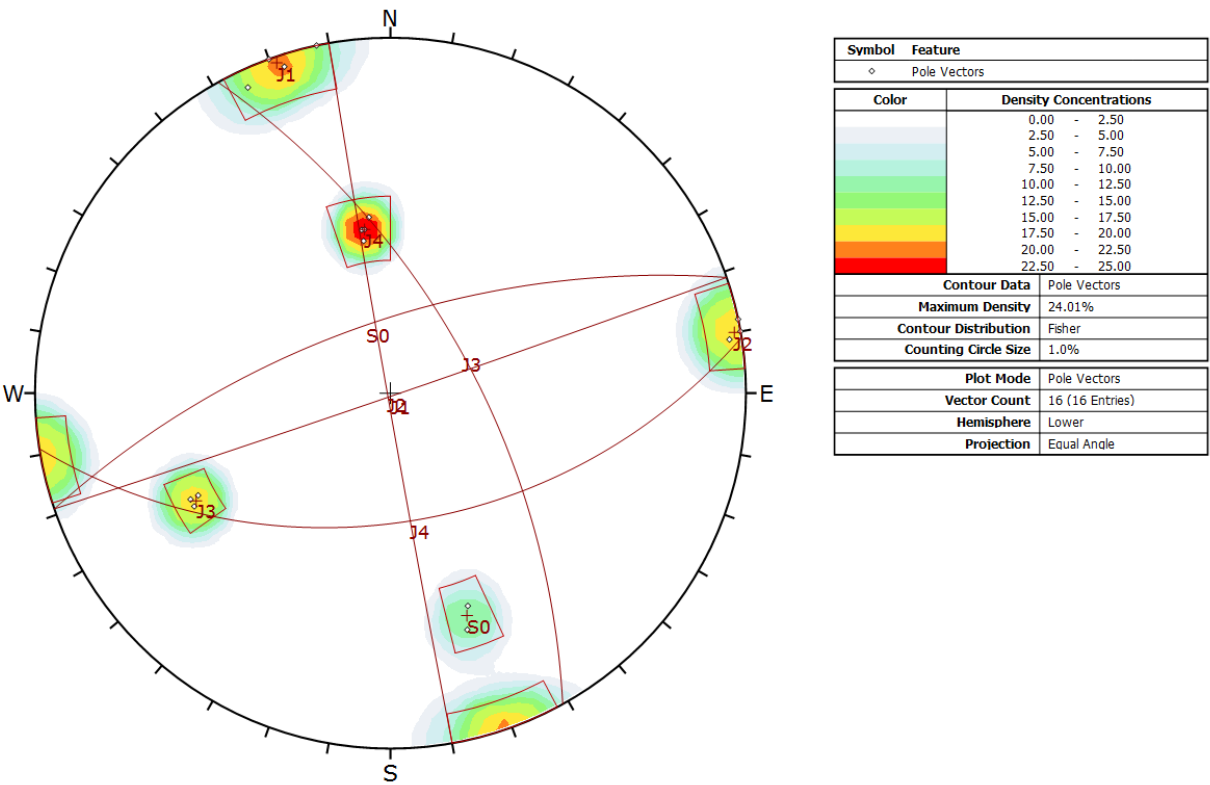


Figura 11. Familias de discontinuidades agrupadas

Fundamentalmente existen tres tipologías de inestabilidad de taludes en roca: rotura plana, rotura por cuñas y vuelco.

La rotura plana se genera a través de una discontinuidad o superficie plana preexistente, cuyo origen puede ser: planos de falla, planos de estratificación, juntas tectónicas, etc. Las condiciones cinemáticas para que se produzca la rotura plana aparecen reflejadas a continuación:

- La dirección de buzamiento de la discontinuidad planar (β) debe estar dentro de un rango de 20° con respecto a la dirección de buzamiento de la cara principal del talud o ladera (α).
- El buzamiento de la discontinuidad (Ψ_p) debe ser menor que el buzamiento de la ladera (Ψ_f), de forma que la discontinuidad aflore en la ladera.
- El buzamiento de la discontinuidad (Ψ_p) debe superar el valor del ángulo de rozamiento de la superficie de las discontinuidades (ϕ_p).

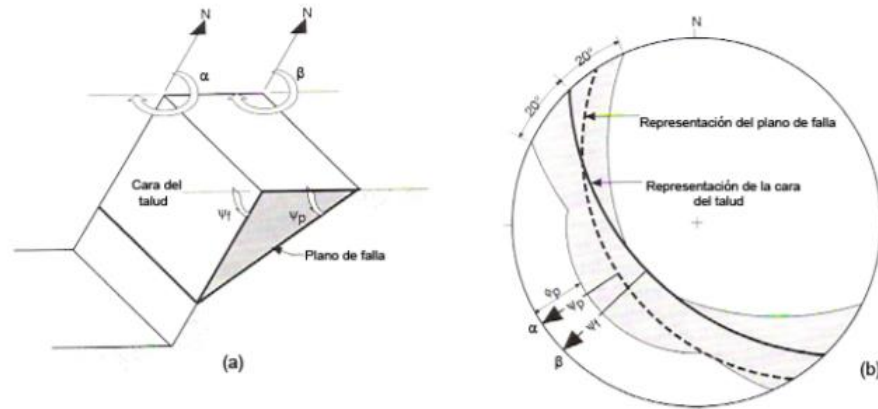


Figura 12. Rotura planar

Por su parte, para la rotura en cuña, el deslizamiento del bloque ocurre a favor de una cuña que se forma por la intersección de dos planos de discontinuidad. La rotura en cuña presenta las siguientes características:

- El rumbo de la línea de intersección (χ) debe aproximarse a la dirección de buzamiento de la ladera (δ).
- La línea de intersección debe aflorar en la ladera. Para esto el buzamiento de la línea de intersección (Ψ_i) debe ser menor que el buzamiento de la ladera (Ψ_p).
- El buzamiento de la línea de intersección (Ψ_i) debe ser mayor que el ángulo de rozamiento de la superficie de las discontinuidades (ϕ). En caso que el ángulo de fricción de ambas superficies que generan la cuña sean muy distintos, puede considerarse un ángulo de rozamiento promedio de ambas.
- Si los buzamientos de los planos de las discontinuidades son menores a los ángulos de dirección de buzamientos de la ladera y del rumbo de la línea de intersección, entonces el deslizamiento

ocurrirá en el plano de las estructuras de mayor buzamiento; en caso contrario el deslizamiento ocurrirá a lo largo de la línea de intersección.

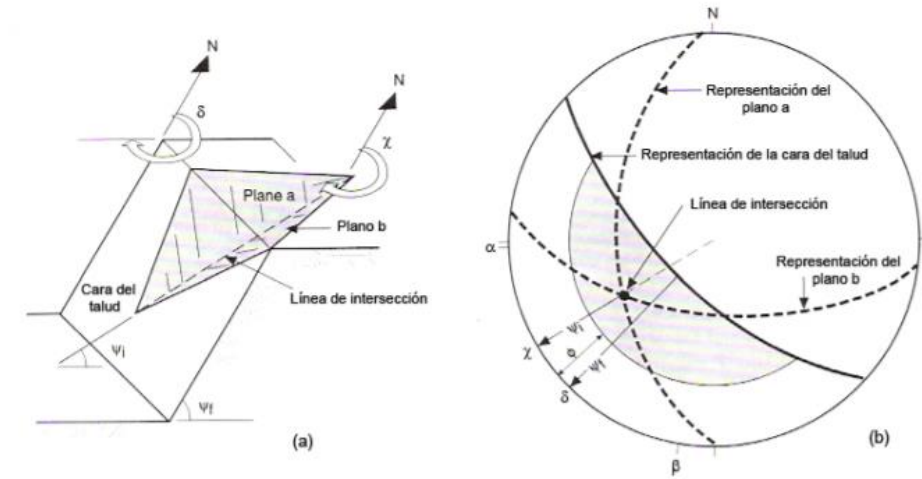


Figura 13. Rotura por cuña

Finalmente, la rotura por vuelco o toppling se genera en taludes de macizos rocosos donde los estratos o discontinuidades presentan un buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo, debiéndose dar las siguientes condiciones cinemáticas:

- La dirección de las superficies potenciales de generar toppling debe ser aproximadamente paralela a la superficie del talud, dentro de un rango de $\pm 20^\circ$.
- El buzamiento de las superficies potenciales de generar toppling (Ψ_p) debe ser en dirección opuesta al buzamiento de la ladera (Ψ_f). Esta condición y la anterior se traducen en que las diferencias entre la dirección de buzamiento de la superficie de toppling (β) y de la ladera (α) deben mantenerse dentro de un rango de 160° a 200° . La recta normal al plano potencial de toppling ($90^\circ - \Psi_p$) debe tener un buzamiento menor que el buzamiento de la ladera (Ψ_f) menos el ángulo de fricción de la superficie (ϕ_p).

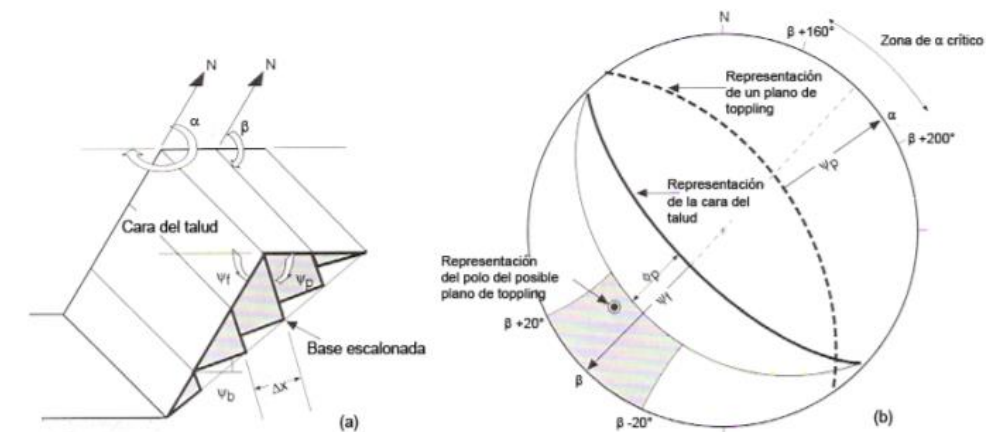


Figura 14. Rotura por vuelco

6.1 TALUD DE LA MARGEN DERECHA

Se muestran a continuación los resultados del análisis cinemático realizado con el programa Dips para el talud de la margen derecha, el cual presenta una dirección de buzamiento de 240° y un buzamiento de 30°. Se ha estimado un valor de ángulo de rozamiento interno de 25° grados para el macizo.

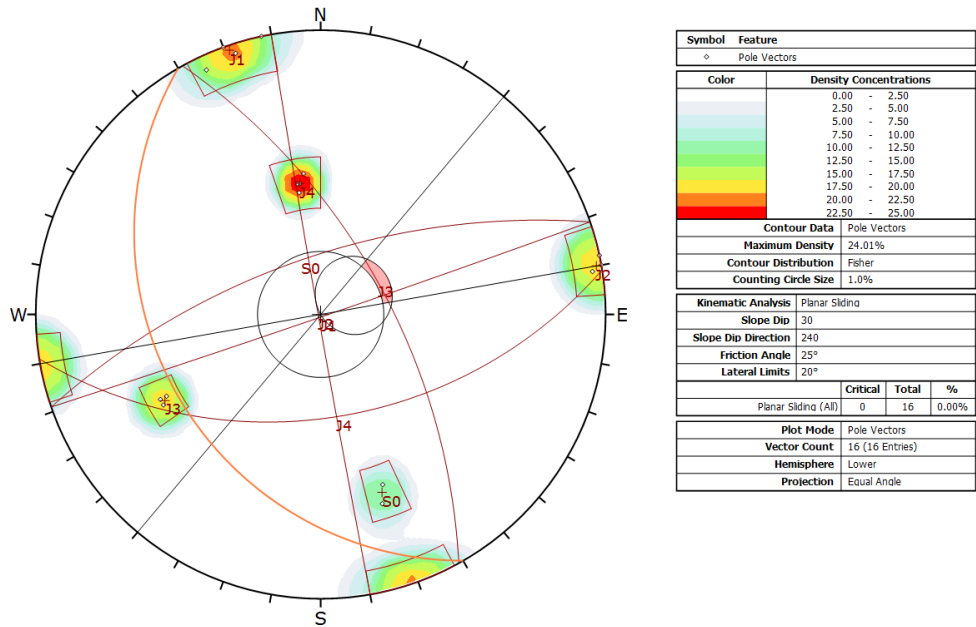


Figura 15. Riesgo de rotura plana en el talud de la margen derecha

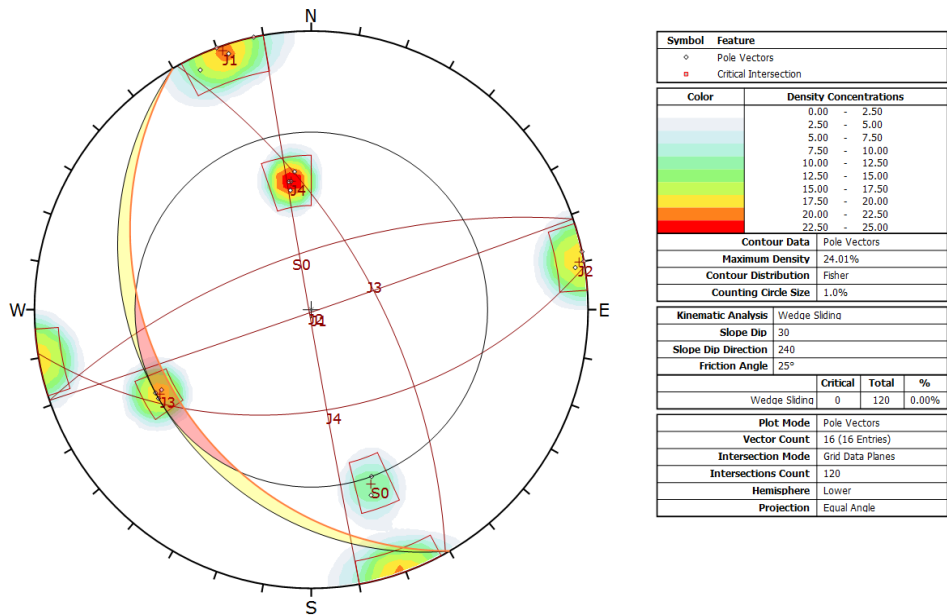


Figura 16. Riesgo de rotura por cuña en el talud de la margen derecha

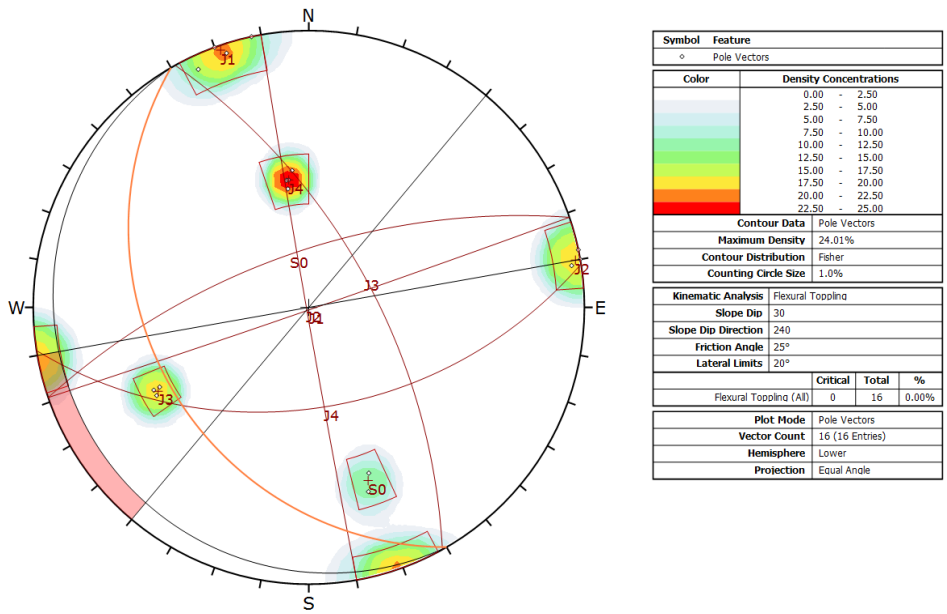


Figura 17. Riesgo de rotura por vuelco en el talud de la margen derecha

Tal y como se puede observar, no existe riesgo de rotura en ninguno de los tres casos.

6.2 TALUD DE LA MARGEN IZQUIERDA

Se muestran a continuación los resultados del análisis cinemático realizado con el programa Dips para el talud de la margen izquierda, el cual presenta una dirección de buzamiento de 80° y un buzamiento de 35°, obteniéndose los resultados siguientes:

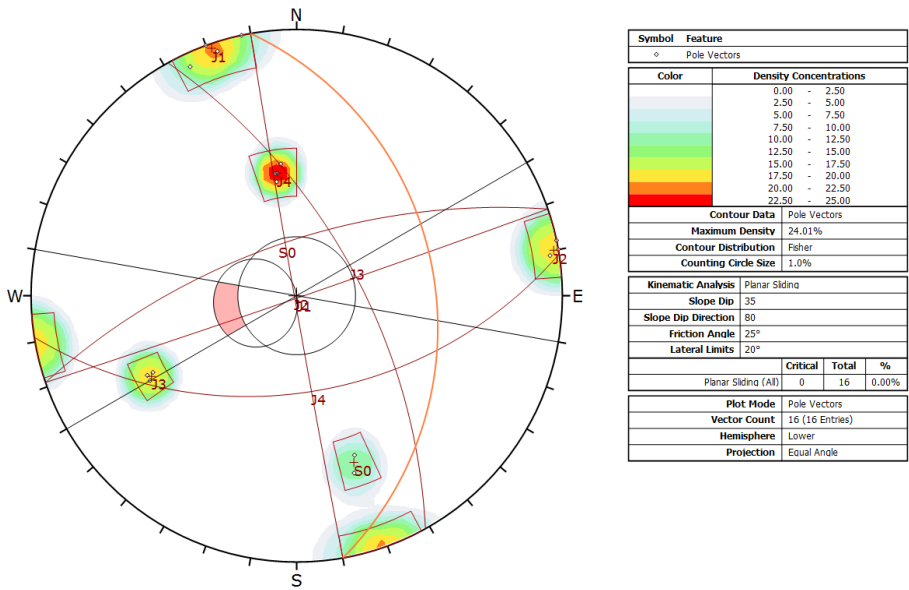


Figura 18. Riesgo de rotura plana en el talud de la margen izquierda

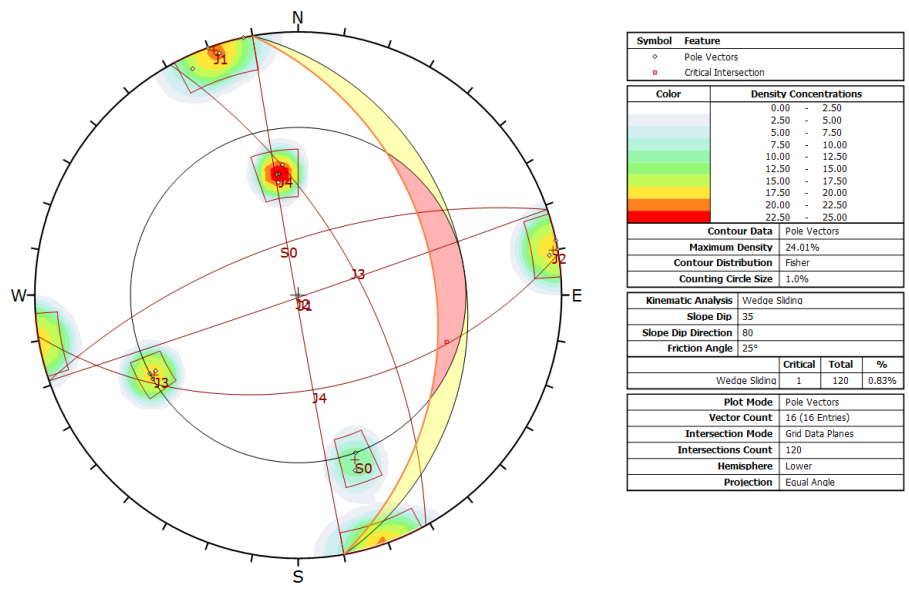


Figura 19. Riesgo de rotura por cuña en el talud de la margen izquierda

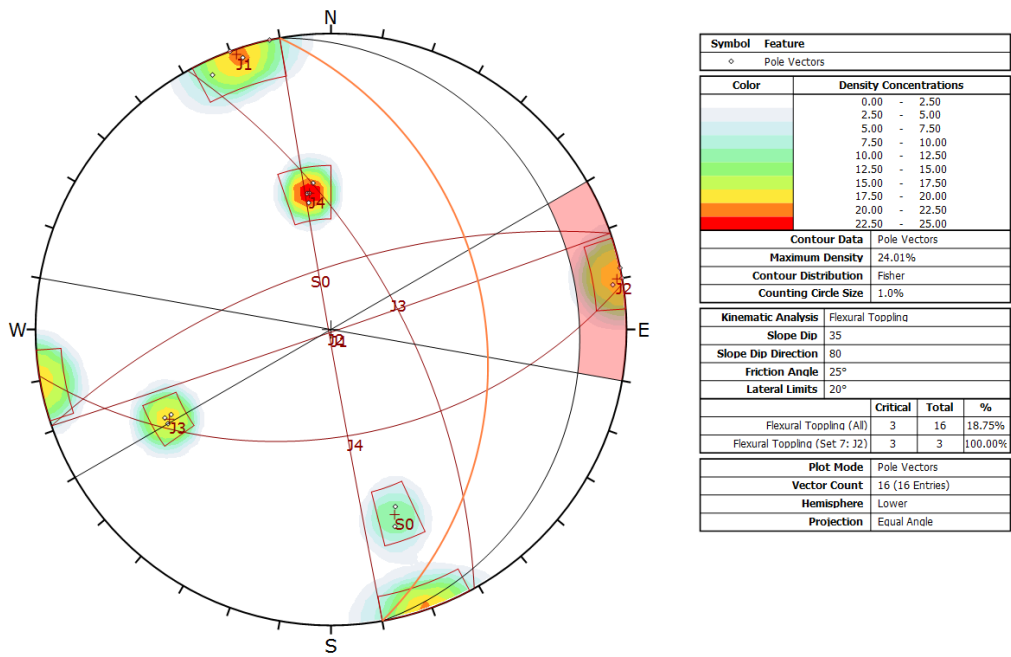


Figura 20. Riesgo de rotura por vuelco en el talud de la margen izquierda

Se concluye que existe riesgo de rotura por cuña en un 0,83% y un riesgo rotura por vuelco muy elevado entre el talud y la familia de diaclasas J2, para el cual será necesario proponer una medida correctora.

El riesgo de rotura por cuña se verá resuelto con la aplicación de la solución para el riesgo de rotura por vuelco, por tanto, no se realizará una solución específica ante el mismo.

A continuación, se detalla la solución para el riesgo de rotura por vuelco.

7. MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD DE LA MARGEN IZQUIERDA

7.1 GENERALIDADES

Para paliar el posible fallo de la ladera izquierda por vuelco, se propone llevar a cabo una serie de anclajes en diferentes puntos de la ladera.

La solución consiste en 3 filas de anclajes con una separación de 1 metros. Cada anclaje propuesto presenta un diámetro de 30 mm, siendo su capacidad resistente 150 kN. La primera fila se anclará hasta una longitud de 8 metros y la segunda y la tercera hasta los 15 metros.

7.2. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Para comprobar el correcto funcionamiento de la solución propuesta se han analizado 2 situaciones, una sin presencia de sismo, y la otra con la presencia del sismo.

Para las dos situaciones deben cumplirse los coeficientes de estabilidad global que vienen recogidos en la Tabla 4.1 de la “ Guía de cimentaciones de obras de carretera”.

COMBINACION DE ACCIONES	CAEFICIENTE NORMAL
Característica	$F_2 \geq 1,30$
Accidental	$F_3 \geq 1,10$

Tabla 11. Coeficientes de estabilidad global

Para la modelización de la solución con los anclajes se ha utilizado el programa RocTopple, de la compañía Rocscience Inc. RocTopple es un programa que se utiliza para analizar el vuelco de bloques de en laderas rocosas. Para el análisis de la ladera, se trabaja con los parámetros de la geometría de la ladera y la resistencia de la roca. Estos parámetros son los siguientes:

- Ángulo del talud
- Altura del talud
- Ángulo superior del talud
- Separación del diaclasado
- Ángulo de las juntas
- Inclinación del plano de apoyo de los bloques.
- Peso específico de la roca
- Ángulo de rozamiento
- Cohesión

Una vez se hayan introducido los parámetros, el programa automáticamente genera un modelo tanto en 3D como en 2D. Tras esta modelización se ha planteado la solución mencionado con anterioridad y que más adelante se mostrará con unas imágenes, así como los cálculos de los anclajes.

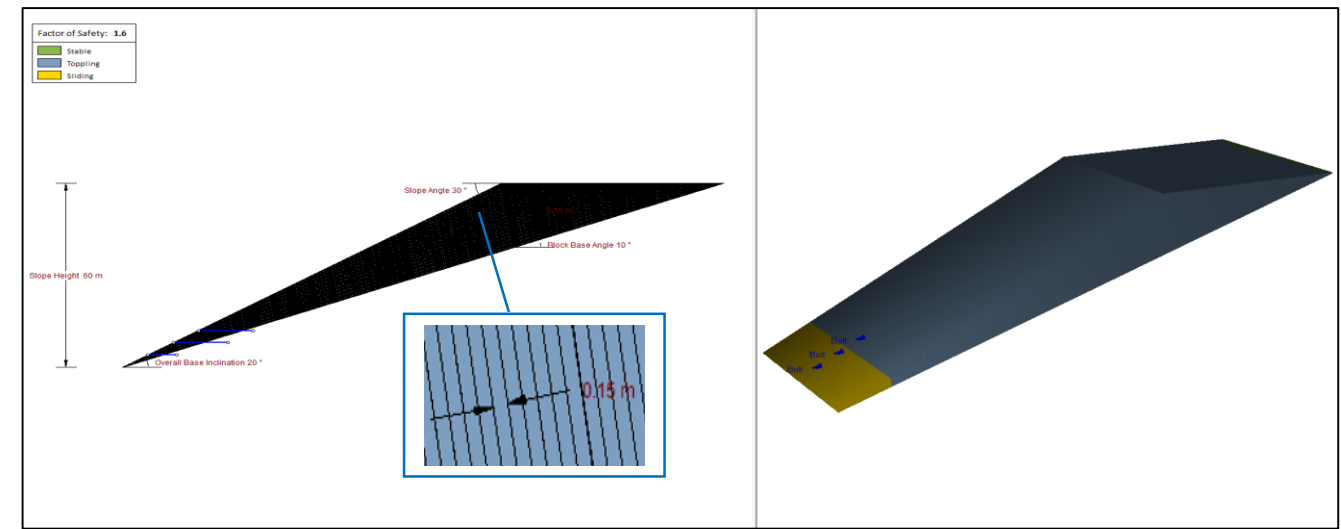


Figura 21. Modelo del talud sin sismo. Programa RocTopple.

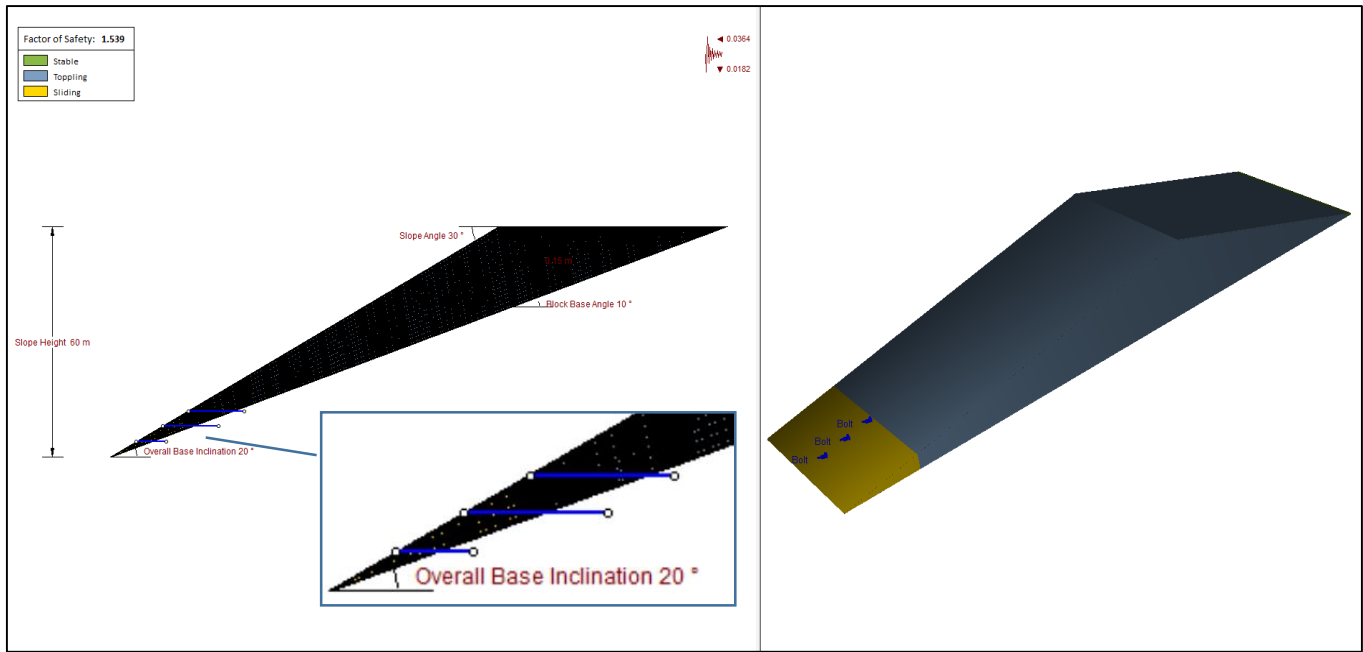


Figura 22. Modelo del talud con sismo. Programa RocTopple.

La modelización del talud como se ha dicho anteriormente se ha realizado tanto con sismo y sin él, para cumplir las dos combinaciones de la Tabla 10. Como se observa para el modelo sin sismo tenemos un coeficiente de 1,6 y para el modelo con sismo un coeficiente 1,539, por tanto, tanto uno como otro cumplen.

Tras obtener los coeficientes de seguridad se procede a las comprobaciones de los anclajes en base a la “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera”.

Considerando una capacidad del anclaje de 150 kN se procede a la evaluación de la estabilidad del propio anclaje:

- 1. Comprobación de la tensión admisible del acero del tirante (rotura del tirante a tracción).
- 2. Comprobación del deslizamiento del tirante dentro del bulbo.
- 3. Comprobación de la seguridad frente al arrancamiento del bulbo (deslizamiento bulbo-terreno).

A continuación, se detalla cada una de ellas.

Comprobación de la tensión admisible del acero del tirante (rotura del tirante a tracción)

Para la comprobación de la tensión admisible del acero del tirante se minorará la tensión admisible en el tirante de forma que se cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:

$$\frac{PN_d}{A_t} \leq \frac{f_{pk}}{1,30}$$
$$\frac{PN_d}{A_t} \leq \frac{f_{yk}}{1,15}$$

Siendo:

- PN_d = carga nominal mayorada de cada anclaje.
- A_t = sección del tirante.
- f_{pk} = límite de rotura del acero del tirante.
- f_{yk} = límite elástico del acero del tirante

La barra del anclaje escogida es la siguiente:

	Limite Elástico (MPa)	Limite Rotura (MPa)
Barra tipo Gewi	500	550

Tabla 12. Tipo de barra y sus características

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{706,858} \leq \frac{550}{1,30} \rightarrow 321,035 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \leq 423,077 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad \text{Cumple}$$

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{706,858} \leq \frac{500}{1,15} \rightarrow 321,035 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \leq 434,782 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad \text{Cumple}$$

Por tanto, la barra GEWI de 30 mm de diámetro cumple la primera comprobación.

Comprobación del deslizamiento del tirante dentro del bulbo

Para la comprobación de la seguridad frente al deslizamiento de la barra en la lechada, dentro del bulbo se minorará la adherencia límite entre la barra y la lechada que lo rodea en el bulbo, por el coeficiente 1,2.

Se deberá verificar:

$$\frac{PN_d}{L_b \cdot p_t} \leq \frac{\tau_{lim}}{1,2}$$

Con:

- $\tau_{lim} = 6,9 (f_{ck}/22,5)^{2/3}$

Siendo:

- PN_d = carga nominal mayorada de cada anclaje.
- p_t = perímetro nominal del tirante = $2 \cdot (\sqrt{\pi \cdot A_t})$
- A_t = sección del tirante.
- L_b = longitud de cálculo del bulbo.
- τ_{lim} = adherencia límite entre el tirante y la lechada expresada en MPa.
- f_{ck} = resistencia característica (rotura a compresión a 28 días) de la lechada expresada en MPa.

Para esta comprobación, el exceso de longitud del bulbo por encima de 14 m se minorará por el coeficiente de 0,70, a fin de tener en cuenta la posible rotura progresiva del mismo.

Por tanto, para las filas 2 y 3 se minorará la longitud del cálculo.

Fila 1

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{8000 \cdot 94} \leq \frac{4,02}{1,2} \rightarrow 0,299 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \leq 3,35 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad \text{Cumple}$$

Filas 2 y 3

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{10500 \cdot 94} \leq \frac{4,02}{1,2} \rightarrow 0,227 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \leq 3,35 \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Cumple

Tras analizar la segunda comprobación, se observa que también la cumple.

Comprobación de la seguridad frente al arrancamiento del bulbo (deslizamiento bulbo-terreno)

Para la comprobación de la seguridad frente al arrancamiento del bulbo se minorará la adherencia límite del terreno que rodea al bulbo del anclaje para obtener la adherencia admisible a_{adm} . Se comprobará:

$$\frac{PNd}{\pi \cdot Lb \cdot Dn} \leq a_{adm}$$

- Siendo:
- PNd = carga nominal mayorada de cada anclaje.
 - Dn = diámetro nominal del bulbo.
 - Lb = longitud de cálculo del bulbo.
 - a_{adm} = adherencia admisible frente al deslizamiento o arrancamiento del terreno que rodea el bulbo.

La adherencia admisible del bulbo se obtiene utilizando correlaciones empíricas, en cuyo caso:

$$a_{adm} = \frac{a_{lim}}{F_3}$$

- Siendo:
- a_{lim} = adherencia límite obtenida aplicando métodos empíricos (véanse figuras 3.2 a 3.5)
 - F_3 = coeficiente indicado en la figura 21.

Respecto adherencia límite al tratarse de anclajes con inyección única global IU, podrá considerarse la adherencia limite indicada en la Tabla 13.

TIPO DE ANCLAJE	F ₃
Provisional	1,45
Permanente	1,65

Tabla 13. Adherencia límite en roca (alteración ≤ grado III, según ISRM).

TIPO DE ROCA	ADHERENCIA LÍMITE (MPa)
Granitos, basaltos, calizas	1,0 – 5,0
Areniscas, esquistos, pizarras	0,7 – 2,5

Tabla 14. Adherencia límite en roca (alteración ≤ grado III, según ISRM).

Como en nuestro caso se trata de calizas, el valor escogido es de 2,5 MPa.

Luego:

$$a_{adm} = \frac{2,5}{1,65} = 1,515 \text{ MPa}$$

Por tanto:

Fila 1

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{\pi \cdot 8000 \cdot 105} \leq a_{adm} \rightarrow 0,085 \text{ MPa} \leq 1,515 \text{ MPa}$$

Cumple

Filas 2 y 3

$$\frac{150.000 \cdot 1,5}{\pi \cdot 10500 \cdot 105} \leq a_{adm} \rightarrow 0,065 \text{ MPa} \leq 1,515 \text{ MPa}$$

Cumple

El diámetro nominal del bulbo se ha escogido según la figura 23, siendo este de 105 mm.

DIÁMETRO DE LA BARRA (mm)	DIÁMETRO MÍNIMO EXTERIOR DE LA ENTUBACIÓN (mm) (*)	DIÁMETRO MÍNIMO DE LA PERFORACIÓN NO ENTUBADA (mm)
TIPO 5. ANCLAJES PROVISIONALES CON INYECCIÓN ÚNICA GLOBAL (IU)		
φ ≤ 25	90	68
25 < φ ≤ 40	101	85
TIPO 7. ANCLAJES PERMANENTES CON INYECCIÓN ÚNICA GLOBAL (IU)		
φ ≤ 25	114	85
25 < φ ≤ 40	133	105
TIPOS 6 A, 6 B, 8 A Y 8 B. ANCLAJES CON REINYECCIÓN (IR, IRS)		
φ ≤ 20	133	105
20 < φ ≤ 25	152	114
25 < φ ≤ 40	178	133

Tabla 15. Diámetros mínimos de perforación para anclajes de barra.

Finalmente, y tras hacer esta última comprobación, vemos que las 3 comprobaciones cumplen.

7.3 REPLANTEO DE LOS ANCLAJES A DISPONER

Tras realizar los cálculos y las comprobaciones de los anclajes, por consiguiente, se procede al replanteo de estos. Para hacerlo más detallado se muestra un esquema con unas acotaciones a seguir.

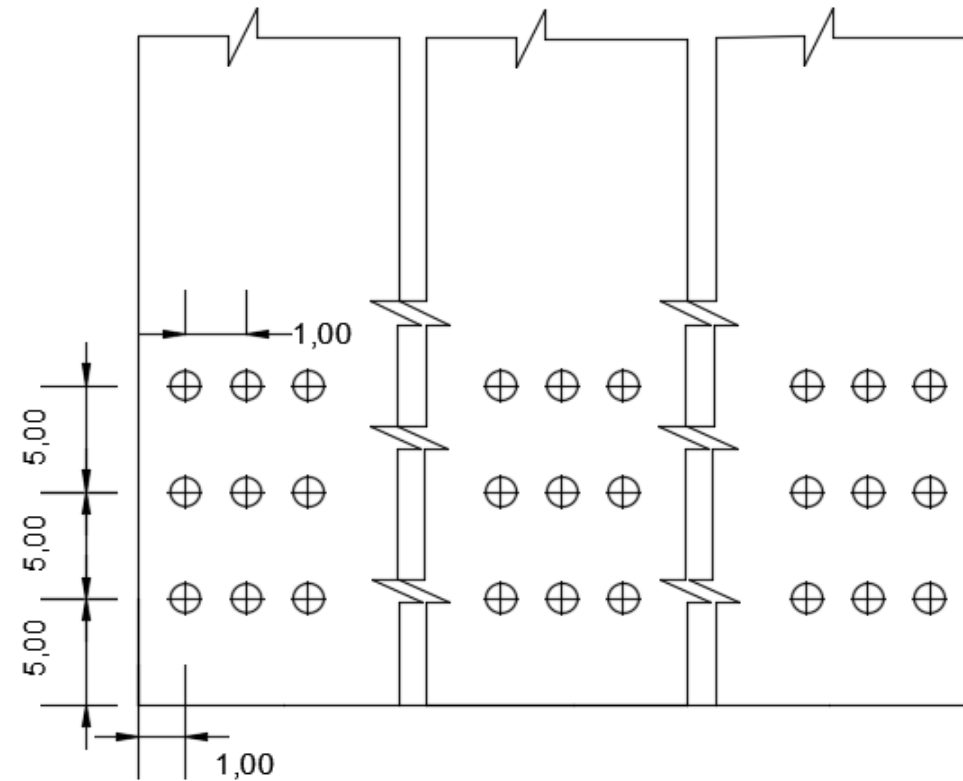


Figura 23 Esquema de los anclajes. Cotas en metros.



Figura 24. Replanteo de los anclajes

Como se ha comentado al principio del apartado, se harán 3 filas de anclajes, cada fila estará constituida por 39 anclajes, formando un total de 156 anclajes de 150 KN de capacidad y 1 metro de separación.

7.4 EJECUCIÓN DE LOS ANCLAJES

La ejecución de los anclajes comporta las siguientes operaciones:

- Fabricación, transporte y almacenamiento de las barras.
- Perforación de los taladros.
- Instalación de los tirantes.
- Inyección del anclaje.

Estas operaciones se detallan a continuación:

a) Fabricación, transporte y almacenamiento de las barras.

Respecto a la fabricación, transporte y almacenamiento las barras, estas no deben retorcerse ni doblarse con radios inferiores a los indicados por el fabricante. También se tendrá especial cuidado con las protecciones y elementos auxiliares, los cuales se guardarán en un lugar seco y limpio.

b) Perforación de los taladros.

Las perforaciones se efectuarán respetando los diámetros, profundidades y posiciones indicadas. El diámetro de la barra, así como el de la perforación, viene definidos en la Figura 23 (Tabla 4.2 de la "Guía de cimentaciones de obras de carretera"), en nuestro caso la perforación es sin entubación. Por lo que respecta al sistema de perforación se utilizaran equipos hidráulicos a rotopercusión.

c) Instalación de los tirantes.

Antes de proceder a la colocación del tirante, se comprobará la perforación, de forma que se encuentre libre de obstáculos. La colocación se efectuará de forma controlada para no alterar la posición de ningún elemento del tirante.

d) Inyección del anclaje.

En este caso se utilizará inyección única global (IU), ésta se efectuará de fondo a boca de la perforación, manteniéndose de una forma interrumpida hasta que la lechada que rebose por la boca sea de las mismas características que la inyectada inicialmente. En la composición de las lechadas se empleará cemento EN 197-1 CEM II / 42.5 R.

Una vez concluido el anclaje se debe proceder en el plazo más breve posible al corte de las longitudes sobrantes de las barras y a la colocación de las protecciones de las cabezas.

8. CONCLUSIONES

El objeto de estudio es el análisis y la descripción geotécnica de la zona del emplazamiento de la presa de Alloz.

Tras una breve introducción de la geología regional y local, hay que recordar que el terreno existente en la zona de estudio se trata de roca en su totalidad, por lo que, siendo el material más desfavorable (en cuanto a resistencia) las margas, a priori reúnen la resistencia suficiente como para recibir los esfuerzos que transmite la estructura en la cerrada.

Por otro parte, se ha caracterizado geotécnicamente el Keuper aflorante en Alloz referenciándose a la serie que el autor Federico Ortí (1974) Cabo cita en su libro “El triásico superior de Levante”, denominada “yesos con matriz arcillosa rojiza, de aspecto caótico, sin estratificación definida, con nódulos”.

Asimismo, se han analizado los sondeos realizados en el emplazamiento de la zona, diferenciando se un total de 5 unidades geotécnicas, las cuales son las siguientes:

- Gravas limosas (Unidad Geotécnica 1)
- Margas yesosas (Unidad Geotécnica 2)
- Brechas y conglomerados (Unidad Geotécnica 3)
- Calizas (Unidad Geotécnica 4)
- Margas con calizas (Unidad Geotécnica 5)

De los sondeos realizados se tomaron muestras inalteradas, las cuales se ensayaron en el laboratorio según las normas respectivas. En base a los resultados se han obtenido los parámetros de cada unidad geotécnica:

	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E (MPa)	c (MPa)	Φ (º)	RCS (MPa)	γ (kN/m³)	RMR	GSI
U.G.1	-	-	-	74,16	-	45,2	-	20	-	-
U.G.2	- 0,014	0,242	1,097	781,30	0,398	18,0	15,0	25	49	44
U.G.3	- 0,042	1,659	6,134	3218,94	1,670	33,0	30,6	26	-	60
U.G.4	- 0,752	5,962	10,55	3218, 94	3,690	20,0	110,0	23	65	60
U.G.5	- 0,023	0,374	1,414	1118,05	0,499	19,5	17,0	25	53	48

Finalmente, se ha llevado a cabo el análisis cinemático por medio de proyección estereográfica ante rotura planar, rotura por vuelco o toppling y rotura en cuña de los taludes de la ladera de la margen derecha e izquierda a partir de los datos obtenidos de la estación geomecánica situada junto al estribo derecho, que recoge los siguientes datos:

Sistema	Dirección de buzamiento (º)	Buzamiento (º)
J1	161	89
J2	260	89
J3	61	64
J4	171	50
S0	341	67

Concluir que no existe riesgo de rotura en ninguno de los tres casos en la margen derecha.

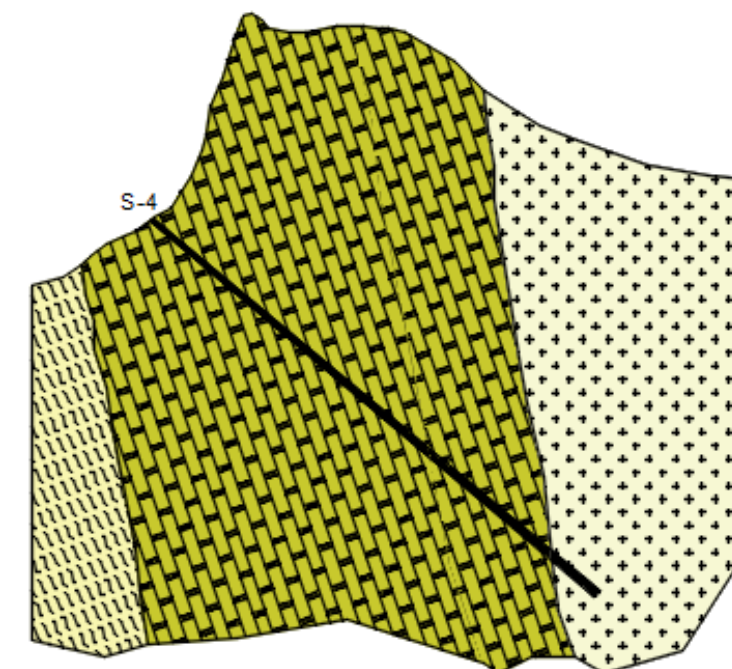
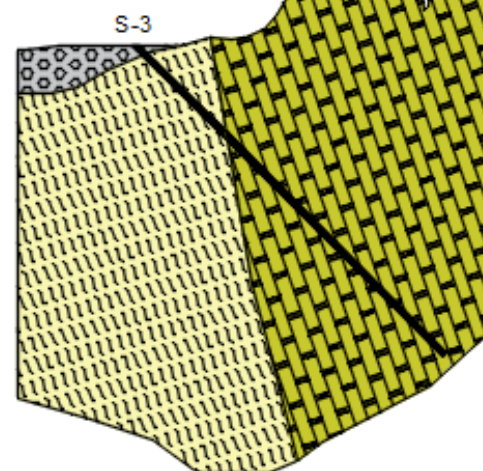
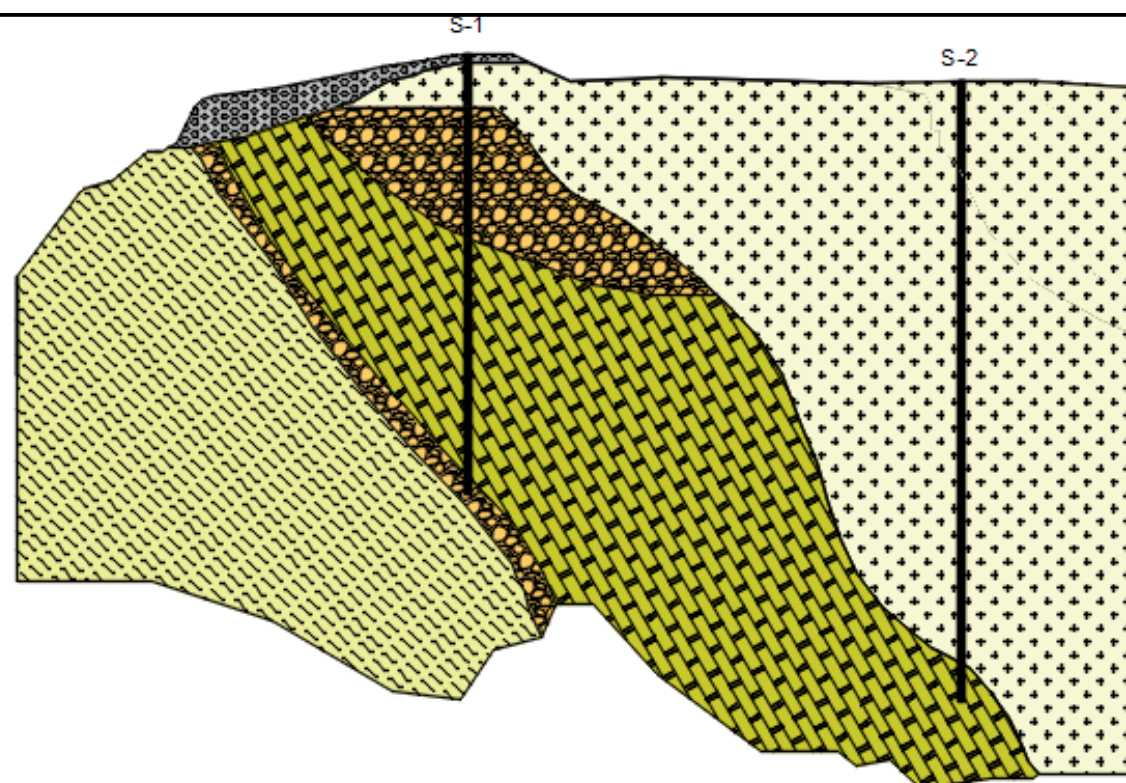
En cambio, en la margen izquierda existe riesgo de rotura por vuelco del talud con la familia de diaclasas J2. Como solución al riesgo de rotura por vuelco en el talud izquierdo se ha optado por anclajes. La solución consiste en 3 filas de anclajes con una separación de 1 metros. Cada anclaje propuesto presenta un diámetro de 30 mm, siendo su capacidad resistente 150 kN. La primera fila se anclará hasta una longitud de 8 metros y la segunda y la tercera hasta los 15 metros.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Las fuentes de información o referencias empleadas para la redacción de este estudio son las mencionadas a continuación:

- 1) DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2003). *Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera* (2.ª edición y sucesivas), pp. 25-35.
- 2) GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER GIJÓN, M., ORTUÑO ABAD, L., & OTEO MAZO, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- 3) HOEK et al. (1995). *Estimación de macizos rocosos en la práctica*.
- 4) TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1955). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley and Sons.
- 5) ORTÍ CABO, F. (1994). *El triásico superior de Levante*.
- 6) MUROMACHI, T. (1974). *Experimental study on application of static cone penetrometer to subsurface investigation of weak cohesive soils*. Proceedings of the European Symposium on Penetrometer Test, 2.
- 7) Manual de usuario del programa RocData. Rocscience Inc.
- 8) Manual de usuario del programa Dips. Rocscience Inc.

CARACTERIZACIÓN DE LAS JUNTAS Y DISCONTINUIDADES DEL MACIZO ROCOSO																	CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
TIPO DE PLANO (1)	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO (°)	BUZAMIENTO (°)	ESPACIADO (mm) (ISRM, 1981)						CONTINUIDAD (m) (ISRM, 1981)					ABERTURA (ISRM, 1981)						RUGOSIDAD (ISRM 1981)						LITOLOGÍA (2)	ESPESOR (mm)	METEORIZACIÓN (ISRM, 1981)						HUMEDAD (%) (Bieniawski, 1989)			RESISTENCIA (Mpa) (ISRM, 1981) (4)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			<20	≥20, <60	≥60, <200	≥200, <600	≥600, <2000	≥2000, <6000	≥6000	SEGUN DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO					SEGÚN BUZAMIENTO					Escalonada			Ondulada					Plana			I Fresco	II Lig. Meteorizada	III Mod. Meteorizada	IV Altamente Meteorizada	V Completamente Meteorizada	VI Suelo residual	Seco	Ligeram. húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	Muy blanda < 0,025	Débil 0,025-0,05	Firme 0,05-0,1	Rígida 0,1-0,25	Muy Rígida 0,25-0,5	Dura >0,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
										< 1	≥1, <3	≥3, <10	≥10, <20	≥20	< 1	≥1, <3	≥3, <10	≥10, <20	≥20	Muy cerrada < 0,1 mm	Cerrada ≥0,1, <0,25 mm	Parcialm. Abierta ≥0,25, <0,50 mm	Abierta ≥0,50, <2,50 mm	Moderad. Abierta ≥2,50, <10 mm	Ancha ≥1 cm			Muy ancha ≥1, <10 cm	Extrem. ancha ≥10, <100 cm	Cavernas ≥1 m																		I Rugosa	II Lisa	III Pulida	IV Rugosa	V Lisa	VI Pulida	VII Rugosa	VIII Lisa	IX Pulida																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
										< 1	≥1, <3	≥3, <10	≥10, <20	≥20	< 1	≥1, <3	≥3, <10	≥10, <20	≥20	< 0,1 mm	≥0,1, <0,25 mm	≥0,25, <0,50 mm	≥0,50, <2,50 mm	≥2,50, <10 mm	≥1 cm			≥1, <10 cm	≥10, <100 cm	≥1 m																		I Rugosa	II Lisa	III Pulida	IV Rugosa	V Lisa	VI Pulida	VII Rugosa	VIII Lisa	IX Pulida																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
J	160	90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				



LEYENDA

UG-1		GRAVAS LIMOSAS
UG-2		MARGAS YESOSAS
UG-3		BRECHAS Y CONGLOMERADOS
UG-4		CALIZAS
UG-5		MARGAS CON CALIZAS

UNIDAD GEOTÉCNICA	σ_t	σ_c	σ_{cm}	E	c	ϕ	RCS
U.G.1				74,16 MPa		45,2°	
U.G.2	- 0,014 MPa	0,242MP a	1,097 MPa	781,3 MPa	0,398 MPa	18°	15 MPa
U.G.3	- 0,042 MPa	1,659 MPa	6,134 MPa	3218,94 MPa	1,67 MPa	33°	30,6 MPa
U.G.4	- 0,752 MPa	5,962 MPa	10,55 MPa	3218, 94 MPa	3,69 MPa	20°	110 MPa
U.G.5	- 0,023 MPa	0,374 MPa	1,414 MPa	1118,05 MPa	0,499 MPa	19,5°	17 MPa

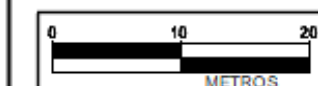
TÍTULO

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA DE LAS FILTRACIONES EN LA CERRADA DE LA PRESA DE ALLOZ (NAVARRA)

ESCALA

1:1000

NUMÉRICA



GRÁFICA

FECHA:

ABRIL 2018

ANEJO 5:

PERFIL GEOTÉCNICO.

Correlación entre los sondeos S-1, S-2, S-3 Y S-4.

APÉNDICE III: CÁLCULO Y COMPROBACIONES DE LOS ANCLAJES

	Limite Elastico (Mpa)	Limite Rotura (Mpa)	Capacidad Anclaje
Barra tipo Gewi	500	550	150kN

Comprobación de la tensión admisible del acero						
Ø (mm)	At (mm ²)	f _{pk} (MPa)	f _{yk} (MPa)	P _{Nd} (kN)		¿Cumple ?
16	201,062	550	500	85	87	NO
20	314,159			133	137	NO
30	706,858			299	307	SI

Comprobación de la tensión admisible del acero							
Ø (mm)	At (mm ²)	f _{ck} (MPa)	τ _{lim} (Mpa)	Pt (mm)	Lb (mm)	P _{Nd} (kN)	¿Cumple ?
30	706,858	10	4,02	94	8000	2525	SI
30	706,858			94	10500	3314	SI

Comprobación de la seguridad frente al arrancamiento del bulbo				
P _{Nd} (kN)	Dn (mm)	Lb (mm)	a _{adm} (Mpa)	¿Cumple ?
3.998	105	8000	1,515	SI
5.248	105	10500	1,515	SI