

ANÁLISIS DE ROTURA PLANA Y CIRCULAR
DE TALUDES DEL PROYECTO DE
EXPLOTACIÓN 'SOFÍA' NUM. 40597
(LUCAINENA DE LAS TORRES Y SORBAS)

Nº Reg. Entrada: 202399903533558. Fecha/Hora: 17/03/2023 10:42:37

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 1/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	
			

1 Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	0
2.	CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	0
1.1	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR89	1
1.2	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA GSI	4
1.3	RELACIÓN ENTRE RMR Y GSI	7
3.	CÁLCULO Y JUSTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DEL CRITERIO DE MOHR – COULOMB: ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ) Y COHESIÓN (c)	8
4.	ANÁLISIS DE ROTURA PLANA Y CIRCULAR. DETERMINACIÓN DE FACTOR DE SEGURIDAD (FS) EN LAS DIFERENTES FASES DE EXPLOTACIÓN	9
4.1.	AVANCE DE EXPLOTACIÓN	9
4.1.1	ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN	9
4.1.2	ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE UN TALUD	11
4.1.3	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN	13
4.1.4	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE UN BANCO	13
4.1.5	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN	13
4.1.6	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE UN BANCO	14
4.2.	FINAL DE EXPLOTACIÓN	14
4.2.1	ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE UN TALUD	14
4.2.2	ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL	16
4.2.3	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN	18
4.2.4	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE UN BANCO	19

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 2/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	

4.2.5	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN.....	19
4.4.12	ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE UN TALUD.....	20
5.	CONCLUSIÓN	20

Nº Reg. Entrada: 202399903533558. Fecha/Hora: 17/03/2023 10:42:37

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 3/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	
			

1. INTRODUCCIÓN

Atendiendo al requerimiento con asunto 'Requerimiento documentación, Exte Concesión Derivada de Permiso de Investigación SOFIA nº 40.597/06' se presentan los siguientes datos para dar respuesta al punto 1 de dicho requerimiento en el cual se demanda el estudio de rotura plana considerando los valores obtenidos en los ensayos de rotura presentados anteriormente a la presente administración.

Dichos datos corresponden a los ángulos de posibles roturas en el material de naturaleza yesífera presentes en la futura explotación.

A continuación, se presentan los cálculos del factor de seguridad para cada uno de las fases de la explotación cuyas características se desarrollaron en el estudio geotécnico presentado a la autoridad competente.

Además, los valores de cohesión y ángulo de rozamiento interno utilizados en el proyecto presentado fueron obtenidos en base a datos presentes en bibliografía, pero no de forma empírica, por lo que se aprovecha el siguiente informe para determinar los mismos de forma exhaustiva, realizando una evaluación geomecánica del macizo rocoso a partir de ensayos simples, observaciones de campo, análisis de testigos, y los cálculos necesarios para ello, los cuales se incluyen en el presente documento.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

La caracterización del macizo rocoso se lleva a cabo a partir de clasificaciones geomecánicas, las cuales tienen como objetivo proporcionar una evaluación del comportamiento mecánico del macizo rocoso a partir de ensayos simples y observaciones de campo.

En este caso, la clasificación del macizo rocoso se ha realizado a partir de dos clasificaciones geomecánicas para tener la máxima información del posible comportamiento del macizo rocoso. Las clasificaciones que se han tenido en cuenta para ello y que se exponen a continuación son la clasificación geomecánica de Bieniawski o RMR (Rock Mass Rating) del año 1989 y la clasificación geomecánica GSI (Geological Strength Index).

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 4/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	
			

1.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR89

La clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating) o de Bieniawski, 1979/1989, la cual permite obtener un índice de calidad del macizo a partir de la resistencia de la roca intacta, grado de fracturación y diaclasado de las discontinuidades del macizo, presencia de agua y orientación de las discontinuidades respecto al elemento de estudio.

Esta clasificación otorga una puntuación a cada uno de los parámetros anteriores pudiéndose obtener un mínimo de 15 puntos para una roca con una calidad mala y un máximo de 100 para una roca con una calidad muy buena.

Además, El RMR permite la obtención de la cohesión y ángulo de fricción, parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb que veremos en el siguiente punto.

Los parámetros que influyen en el índice RMR son:

- **Resistencia de la roca matriz**

Se mide a partir del ensayo de rotura a compresión simple de testigos de rocas o a partir del ensayo de carga puntual. La puntuación va desde 0 hasta 15 puntos dependiendo de la resistencia de la roca.

- **RQD**

Valora el grado de fracturación del macizo desde 3 puntos para un valor de RQD inferior al 25% hasta 20 puntos para un valor de RQD superior al 90%.

- **Separación entre discontinuidades**

Puntúa el espaciamiento entre discontinuidades. La puntuación alcanza valores de 20 puntos para diaclasas separadas más de 2 m y un valor mínimo de 5 para diaclasas espaciadas menos de 6 cm.

- **Estado de las discontinuidades**

Permite puntuar el estado de las diaclasas a través de persistencia o longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad, presencia de relleno y alteración de las juntas.

El valor máximo es de 20 puntos mientras que el mínimo es de 0 puntos.

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 5/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	

- **Presencia de agua freática**

Mide las filtraciones de agua en el macizo, el flujo de agua y la humedad presente en las discontinuidades. La puntuación alcanza un valor de 15 para un macizo rocoso seco y un valor de 0 para cuando el agua está fluyendo entre las juntas con un caudal superior a 125 l/min o la relación presión de agua/tensión principal mayor es superior a 0,5.

Las distintas clases en las que se puede clasificar el macizo según este índice se recogen en la siguiente tabla:

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2,5 m de vano	30 minutos con 1 m de vano
Cohesión	>4 Kp/cm ²	3-4 Kp/cm ²	2-3 Kp/cm ²	1-2 Kp/cm ²	<1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

Aunque en nuestro caso tomaremos de referencia el RMR89, hay que tener en cuenta que existen dos versiones para la obtención del RMR, el RMR76, del año 1976, y el RMR89, del año 1989. La diferencia reside en los valores que se le asignan a los parámetros de: presencia de agua subterránea, condición de las discontinuidades, y RQD conjuntamente con el espaciado de las discontinuidades. En la siguiente tabla se muestra la diferencia entre valores que se le dan a los parámetros según el criterio.

Parámetro	RMR ₇₆	RMR ₈₉
RQD y Espaciado de las discontinuidades	8 – 50	8 – 40
Condición de las discontinuidades	0 – 25	0 – 30
Presencia de agua subterránea	0 – 10	0 – 15

En la siguiente tabla se recoge toda la información anteriormente descrita para la clasificación RMR89, así como los parámetros necesarios para la caracterización del macizo rocoso.

Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo puntual carga	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MP	< 1 MPa
	valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor	15	10	7	4	0			

Por lo tanto, la puntuación que obtenemos al realizar el análisis del macizo es la siguiente:

Pámetros de clasificación	Clasificación	Puntuación
1 Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)		
Ensayo de carga puntual	No aplica	0
Compresión simple	5-1	1
2 Índice RQD de la roca		
RQD (%)	25-50	6
3 Separación entre diaclasas		
Separación entre diaclasas (m)	0,6-2	15
4 Estado de las discontinuidades		
Longitud de la discontinuidad (m)	1-3	4
Abertura (mm)	< 0,1	5
Rugosidad	Suave	0
Relleno	Ninguno	6
Alteraciones	Inalterada	6
5 Agua freática		
Caudal por 10 m de tunel	No aplica	0
Presión agua/Tensión principal mayor	No aplica	0
Estado general	Seco	15
Corrección por discontinuidades		
Túneles	No aplica	0
Cimentaciones	No aplica	0
Taludes	No aplica	0
Puntuación		58

1.2 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA GSI

Con la aparición del criterio de rotura de Hoek&Brown el uso del RMR no se ajusta a todo tipo de rocas, sobretudo para el caso de rocas débiles, y se introduce de esta forma la clasificación geomecánica GSI (Hoek, 1994; Hoek et al. 1995).

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo. Las observaciones se basan en

la apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si ésta esta alterada, si ha sufrido erosión o que tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.

Una vez realizadas las observaciones se escoge de la siguiente tabla la situación que más se acerca a la realidad del macizo a estudio, obteniendo de esta forma, el valor del GSI.

Tal y como se observa en la tabla los valores del GSI varían desde 1 hasta 100. Los valores cercanos al 1 corresponden a las situaciones del macizo rocoso de menor calidad, es decir con la superficie muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión.

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 9/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	
			

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slitken-sided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slitken-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →					
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80				
	VERY BLOCKY - Interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70				
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60				
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50				
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	40				
		30				
		20				
		10				
		N/A	N/A			

En nuestro caso, la roca presenta un muy buen estado de conservación y una fracturación cuyos sistemas de diaclasado están distanciados entre sí, por lo que podría clasificarse dentro de una estructura de bloque o 'blocky' atendiendo a la tabla anterior.

Para conocer el valor exacto de la clasificación de GSI es necesario considerar los datos obtenidos por la clasificación RMR.

1.3 RELACIÓN ENTRE RMR Y GSI

Las relaciones existentes entre GSI y RMR, dependiendo del RMR utilizado, se detallan a continuación:

Para el caso de RMR76

$RMR76 > 18 \rightarrow GSI = RMR76$

$RMR76 < 18 \rightarrow$ No se puede utilizar el RMR76 para la obtención del GSI

Para el caso de RMR89

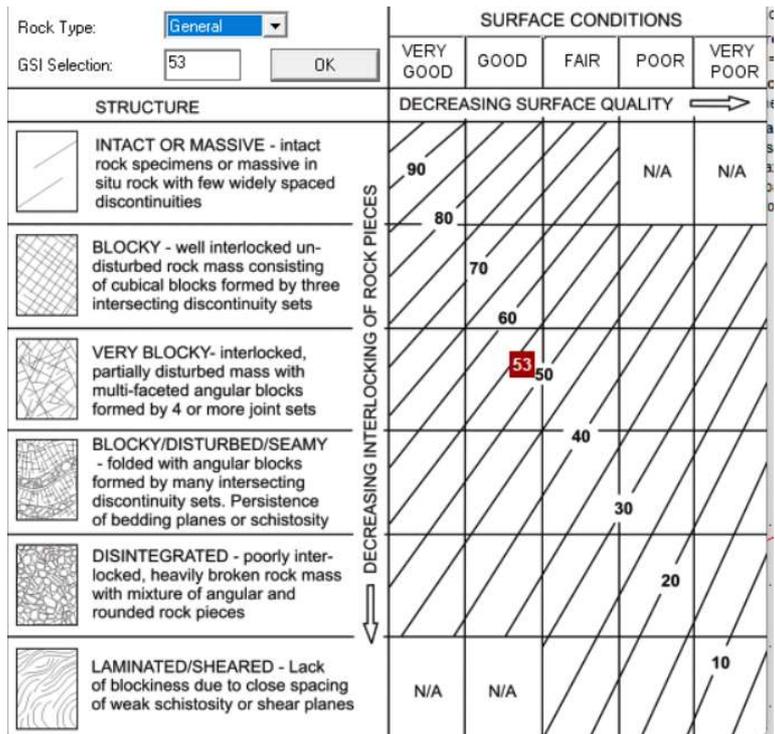
$RMR89 > 23 \rightarrow GSI = RMR89 - 5$

$RMR89 < 23 \rightarrow$ No se puede utilizar el RMR89 para la obtención del GSI

Dado que en nuestro caso hemos utilizado el RMR89 y el valor > 23 , el valor de GSI quedaría de la siguiente manera:

$RMR89 = 58 > 23 \rightarrow GSI = 58 - 5 = 53$

MIGUEL ANGEL MARTINEZ NOGUERA cert. elec. repr. A50021518		17/03/2023 10:42	PÁGINA 11/24
VERIFICACIÓN		https://ws050.juntadeandalucia.es:443/verificarFirma/	
			



En nuestro caso la roca queda clasificada como una roca con unas buenas condiciones de superficie y con presencia de fracturas en su estructura.

3. CÁLCULO Y JUSTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DEL CRITERIO DE MOHR – COULOMB: ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ) Y COHESIÓN (c)

Una vez realizada la clasificación geomecánica del macizo rocoso podemos obtener el ángulo de cohesión y el ángulo de fricción de la roca que nos permitirán calcular el Factor de Seguridad para las condiciones de nuestra explotación.

El RMR permite la obtención de la cohesión y ángulo de rozamiento interno, parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. En las siguientes ecuaciones se muestran las relaciones entre RMR y los parámetros resistentes.

$$c = 5 \times RMR \text{ (KPa)}$$

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (deg)}$$

Donde c es la cohesión y Φ es el ángulo de rozamiento interno.

Por lo tanto, los datos que obtenemos son los siguientes:

Ángulo de rozamiento interno (Φ)	34°
Cohesión (c)	29,57 T/m ²

4. ANÁLISIS DE ROTURA PLANA Y CIRCULAR. DETERMINACIÓN DE FACTOR DE SEGURIDAD (FS) EN LAS DIFERENTES FASES DE EXPLOTACIÓN

4.1. AVANCE DE EXPLOTACIÓN

4.1.1 ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN

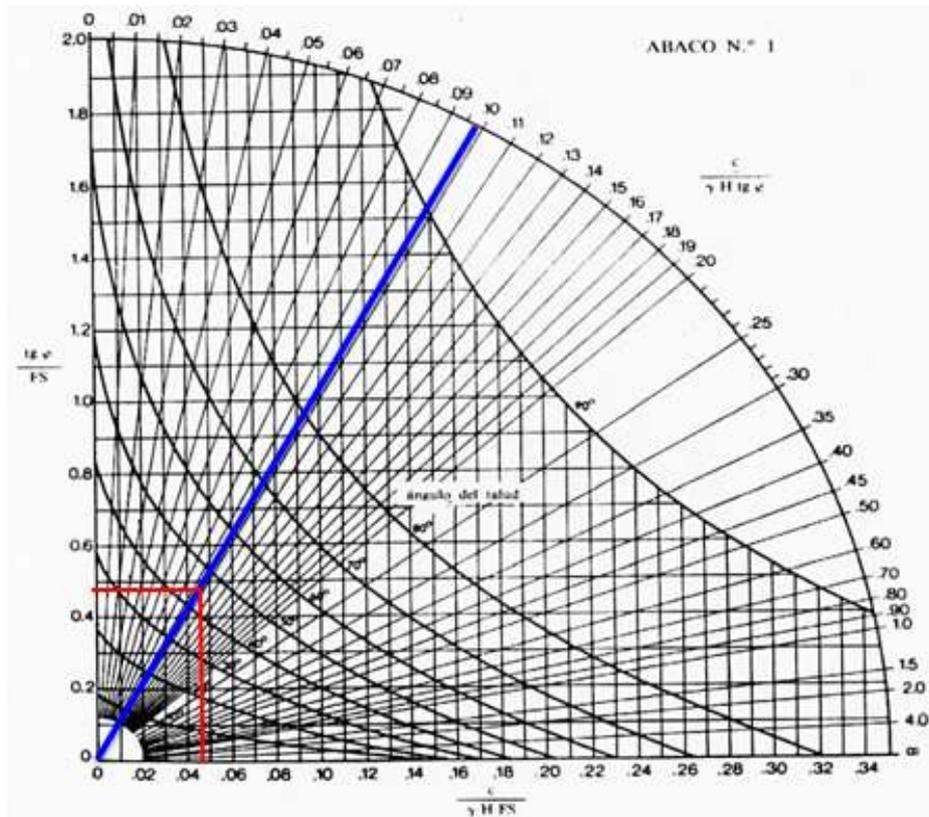
Para el cálculo del factor de seguridad de los taludes finales de restauración se utilizará el Método de Hoek y Bray. Los parámetros principales para el cálculo del talud del relleno preliminar con un ángulo de inclinación de 44° serán los siguientes:

PARÁMETROS	VALORES
Altura de talud (H)	200
Ángulo de talud (α)	44
Ángulo de rozamiento (ϕ)	34
Cohesión en el plano de deslizamiento (c)	29,57 T/m ²
Altura de agua en el talud (z)	0
Densidad de la roca (γ)	2.2 T/m ³

Para la elección del ábaco es necesario considerar la presencia de agua y la altura del nivel freático, dado que en nuestro caso no tenemos agua, utilizamos el ábaco 1.

Para ello, calculamos la siguiente expresión:

$$\frac{c}{\gamma H \operatorname{tg} \phi} = \frac{29,57}{2.2 \times 200 \times \operatorname{tg} 34^\circ} = 0.099$$



$$\frac{\text{tg}\varphi}{F} = 0.48$$

$$\frac{c}{\gamma H F} = 0.048$$

En ambas expresiones despejaremos F:

$$FS \text{ vertical} = \text{tg } 34^\circ / 0.48 = 1,40$$

$$FS \text{ horizontal} = 29,57 / (2.2 \times 200 \times 0.048) = 1.40$$

Se obtiene que el Factor de Seguridad tanto en la horizontal como en la vertical es

$$1,40 > 1.20.$$

4.1.2 ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE UN TALUD

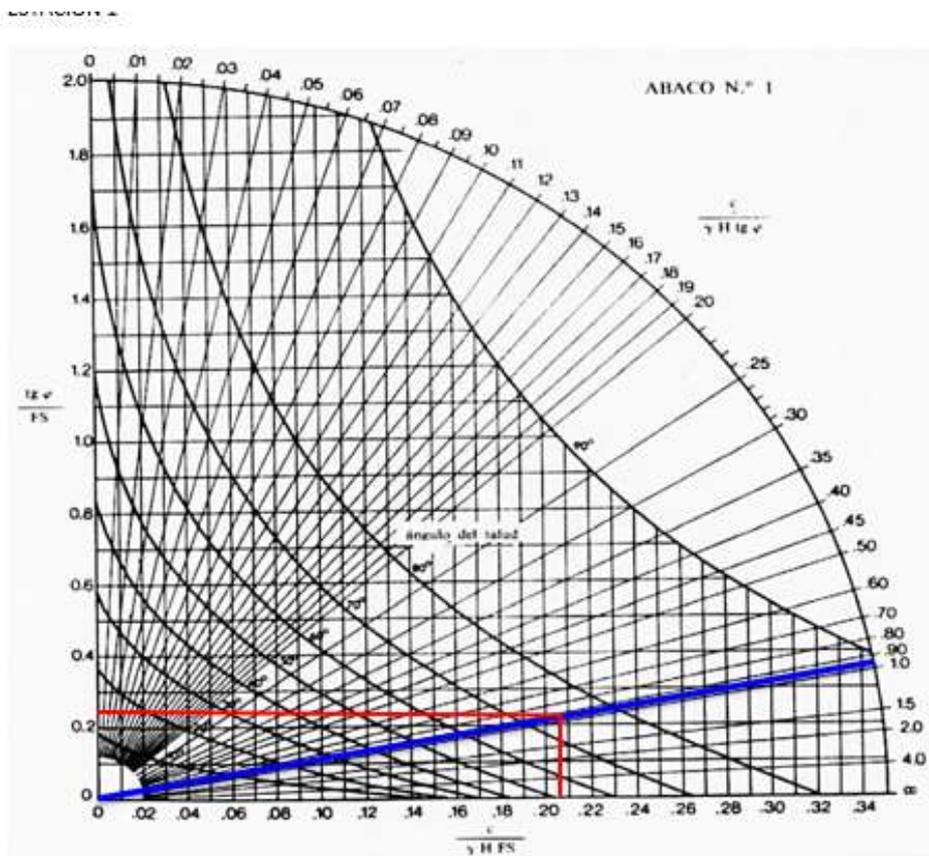
Para el cálculo del factor de seguridad de los taludes finales de restauración se utilizará el Método de Hoek y Bray. Los parámetros principales para el cálculo del talud del relleno preliminar con un ángulo de inclinación de 75º serán los siguientes:

PARÁMETROS	VALORES
Altura de talud (H)	20
Ángulo de talud (α)	75
Ángulo de rozamiento (ϕ)	34
Cohesión en el plano de deslizamiento (c)	29,57 T/m2
Altura de agua en el talud (z)	0
Densidad de la roca (γ)	2.2 T/m3

Para la elección del ábaco es necesario considerar la presencia de agua y la altura del nivel freático, dado que en nuestro caso no tenemos agua, utilizamos el ábaco 1.

Para ello, calculamos la siguiente expresión:

$$\frac{c}{\gamma H \operatorname{tg} \phi} = \frac{29,57}{2.2 \times 20 \times \operatorname{tg} 34^\circ} = 0.99$$



$$\frac{\text{tg}\phi}{F} = 0.25$$

$$\frac{c}{\gamma H F} = 0.28$$

En ambas expresiones despejaremos F:

$$FS \text{ vertical} = \text{tg } 34^\circ / 0,25 = 2,69$$

$$FS \text{ horizontal} = 29,57 / (2,2 \times 20 \times 0,28) = 2,40$$

Se obtiene que los Factores de Seguridad tanto en la horizontal como en la vertical

son:

$$FS H = 2,40 > 1,20$$

$$FS V = 2,69 > 1,20$$

4.1.3 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	200	200	200	200
¥	Ángulo de talud	44	44	44	44
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	5730,74	5730,74	5730,74	5730,74
W	Peso bloque	89563,33	89563,33	89563,33	89563,33
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \varphi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		169457,9818	169457,9818	169457,982	169457,982
Wcosx-u		42287,32626	43495,53558	38662,6983	28997,0237
Wsenx-u		43495,53558	41683,2216	45911,9542	52557,1055
FACTOR DE SEGURIDAD		4,868207857	5,108854575	4,53303902	3,77598811

4.1.4 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE UN BANCO

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	20	20	20	20
¥	Ángulo de talud	75	75	75	75
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	573,07	573,07	573,07	573,07
W	Peso bloque	557,9	557,9	557,9	557,9
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \varphi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		16945,6799	16945,6799	16945,6799	16945,6799
Wcosx-u		263,412485	270,938556	240,834272	180,625704
Wsenx-u		270,938556	259,6494495	285,990698	327,384089
FACTOR DE SEGURIDAD		63,51658708	66,30716333	60,0946614	52,3125778

4.1.5 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	200	200	200	200
∟	Ángulo de talud	44	44	44	44
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	1048,17	1048,17	1048,17	1048,17
W	Peso bloque	89563,33	89563,33	89563,33	89563,33
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \phi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		30994,3869	30994,3869	30994,3869	30994,3869
Wcosx-u		42287,32626	43495,53558	38662,6983	28997,0237
Wsenx-u		43495,53558	41683,2216	45911,9542	52557,1055
FACTOR DE SEGURIDAD		1,684809997	1,787048113	1,51718842	1,14145195

4.1.6 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y TALUD GENERAL DE UN BANCO

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	20	20	20	20
∟	Ángulo de talud	75	75	75	75
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	104,82	104,82	104,82	104,82
W	Peso bloque	557,9	557,9	557,9	557,9
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \phi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		3099,5274	3099,5274	3099,5274	3099,5274
Wcosx-u		263,412485	270,938556	240,834272	180,625704
Wsenx-u		270,938556	259,6494495	285,990698	327,384089
FACTOR DE SEGURIDAD		12,41218649	12,98083228	11,6799662	10,0192808

4.2.FINAL DE EXPLOTACIÓN

4.2.1 ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL DE UN TALUD

Para el cálculo del factor de seguridad de los taludes finales de restauración se utilizará el Método de Hoek y Bray. Los parámetros principales para el cálculo del talud con un ángulo de inclinación de 75º serán los siguientes:

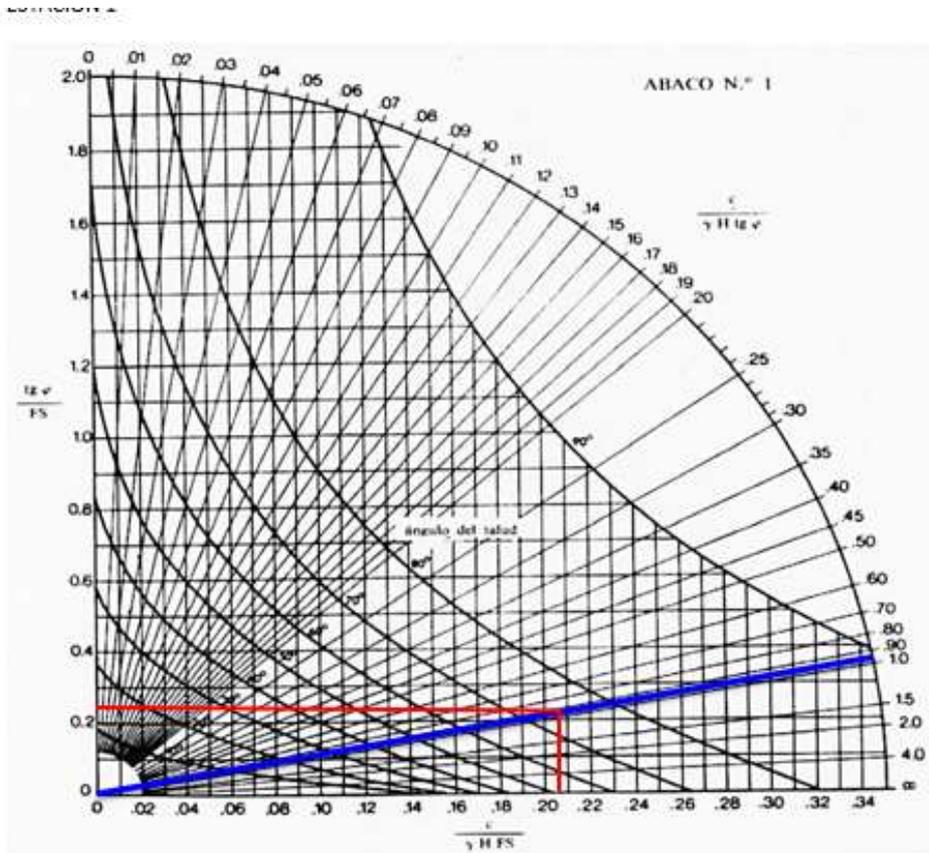
PARÁMETROS	VALORES
Altura de talud (H)	20

Ángulo de talud (α)	75
Ángulo de rozamiento (ϕ)	34
Cohesión en el plano de deslizamiento (c)	29,57 T/m ²
Altura de agua en el talud (z)	0
Densidad de la roca (γ)	2.2 T/m ³

Para la elección del ábaco es necesario considerar la presencia de agua y la altura del nivel freático, dado que en nuestro caso no tenemos agua, utilizamos el ábaco 1.

Para ello, calculamos la siguiente expresión:

$$\frac{c}{\gamma H \operatorname{tg} \phi} = \frac{29,57}{2.2 \times 20 \times \operatorname{tg} 34^\circ} = 0.99$$



$$\frac{\text{tg}\phi}{F} = 0.25$$

$$\frac{c}{\gamma H F} = 0.28$$

En ambas expresiones despejaremos F:

$$FS \text{ vertical} = \text{tg } 34^\circ / 0,25 = 2,69$$

$$FS \text{ horizontal} = 29,57 / (2,2 \times 20 \times 0,28) = 2,40$$

Se obtiene que los Factores de Seguridad tanto en la horizontal como en la vertical son:

$$FS \text{ H} = 2,40 > 1,20$$

$$FS \text{ V} = 2,69 > 1,20$$

4.2.2 ESTUDIO DE ROTURA CIRCULAR PARA EL TALUD GENERAL

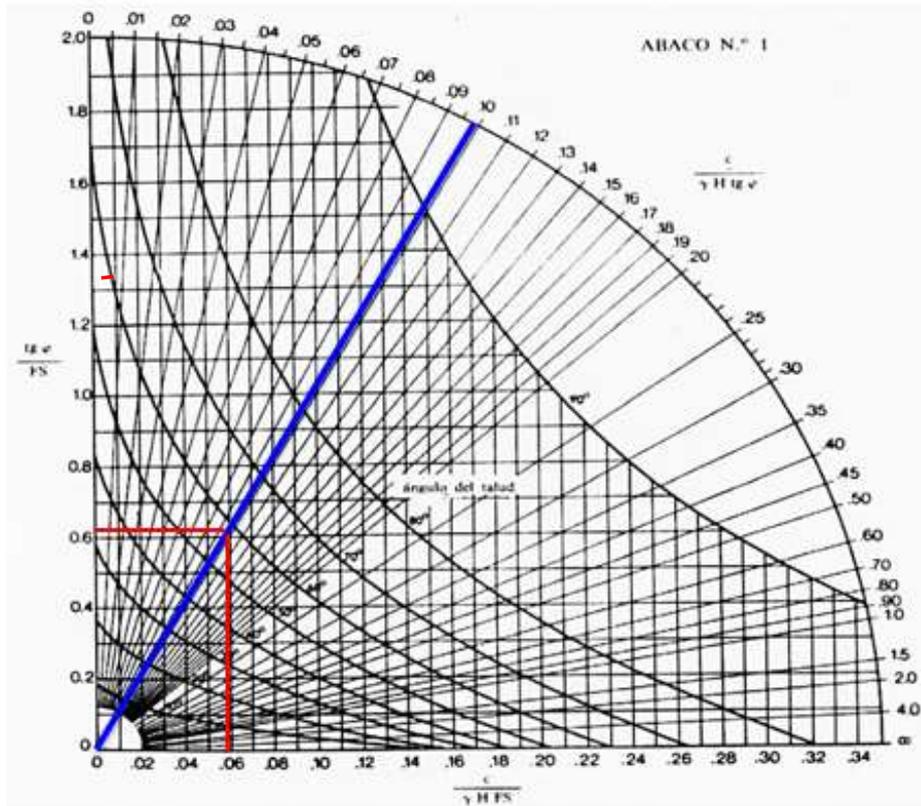
Para el cálculo del factor de seguridad de los taludes finales de restauración se utilizará el Método de Hoek y Bray. Los parámetros principales para el cálculo del talud del final con un ángulo de inclinación de 58º serán los siguientes:

PARÁMETROS	VALORES
Altura de talud (H)	200
Ángulo de talud (α)	58
Ángulo de rozamiento (ϕ)	34
Cohesión en el plano de deslizamiento (c)	29,57 T/m ²
Altura de agua en el talud (z)	0
Densidad de la roca (γ)	2.2 T/m ³

Para la elección del ábaco es necesario considerar la presencia de agua y la altura del nivel freático, dado que en nuestro caso no tenemos agua, utilizamos el ábaco 1.

Para ello, calculamos la siguiente expresión:

$$\frac{c}{\gamma H \operatorname{tg} \varphi} = \frac{29,57}{2,2 \times 200 \times \operatorname{tg} 34^{\circ}} = 0,099$$



$$\frac{\operatorname{tg} \varphi}{F} = 0,60$$

$$\frac{c}{\gamma H F} = 0,056$$

En ambas expresiones despejaremos F:

$$FS \text{ vertical} = \operatorname{tg} 34^{\circ} / 0,60 = 1,12$$

$$FS \text{ horizontal} = 29,57 / (2,2 \times 200 \times 0,056) = 1,20$$

Dado que el factor de seguridad horizontal cumple con el factor de seguridad mínimo necesario y teniendo en cuenta que si no hay deslizamiento en la horizontal no se produce el deslizamiento y que el factor de seguridad en la vertical es superior a 1; es poco probable que se suceda un deslizamiento rotacional en estas condiciones.

4.2.3 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6
H Altura de talud (H)	200	200	200	200
∟ Ángulo de talud	58	58	58	58
α Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A Superficie del plano de rotura	5730,74	5730,74	5730,74	5730,74
W Peso bloque	71494,25	71494,25	71494,25	71494,25
U Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \varphi}{W \operatorname{sen} \alpha}$				
cA	169457,9818	169457,9818	169457,982	169457,982
Wcosx-u	33756,01014	34720,46757	30862,6378	23146,9784
Wsenx-u	34720,46757	33273,78142	36649,3824	41953,8983
FACTOR DE SEGURIDAD	5,852858736	6,136316362	5,46586617	4,5908716

Nº Reg. Entrada: 202399903533558. Fecha/Hora: 17/03/2023 10:42:37

4.2.4 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN W2ºE Y
TALUD GENERAL DE UN BANCO

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	20	20	20	20
¥	Ángulo de talud	75	75	75	75
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	573,07	573,07	573,07	573,07
W	Peso bloque	557,9	557,9	557,9	557,9
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \varphi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		16945,6799	16945,6799	16945,6799	16945,6799
Wcosx-u		263,412485	270,938556	240,834272	180,625704
Wsenx-u		270,938556	259,6494495	285,990698	327,384089
FACTOR DE SEGURIDAD		63,51658708	66,30716333	60,0946614	52,3125778

4.2.5 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y
TALUD GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	200	200	200	200
¥	Ángulo de talud	58	58	58	58
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	1048,17	1048,17	1048,17	1048,17
W	Peso bloque	71494,25	71494,25	71494,25	71494,25
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \varphi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		30994,3869	30994,3869	30994,3869	30994,3869
Wcosx-u		33756,01014	34720,46757	30862,6378	23146,9784
Wsenx-u		34720,46757	33273,78142	36649,3824	41953,8983
FACTOR DE SEGURIDAD		1,864905676	1,974974039	1,68780538	1,29049665

Nº Reg. Entrada: 202399903533558. Fecha/Hora: 17/03/2023 10:42:37

4.4.12 ESTUDIO DE ROTURA PLANA PARA UN ÁNGULO DE ESTRATIFICACIÓN N11ºS Y
TALUD GENERAL DE UN TALUD

PARÁMETROS	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 5	Testigo 6	
H	Altura de talud (H)	20	20	20	20
ψ	Ángulo de talud	75	75	75	75
α	Ángulo del plano de deslizamiento	46	44	50	61
φ	Ángulo de rozamiento	34	34	34	34
c	Cohesión	29,57	29,57	29,57	29,57
z	Altura de agua en el talud	Seco	Seco	Seco	Seco
γ	Densidad de la roca	2,2	2,2	2,2	2,2
A	Superficie del plano de rotura	104,82	104,82	104,82	104,82
W	Peso bloque	557,9	557,9	557,9	557,9
U	Presión del agua	0	0	0	0
$FS = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \phi}{W \operatorname{sen} \alpha}$					
cA		3099,5274	3099,5274	3099,5274	3099,5274
Wcos- <i>u</i>		263,412485	270,938556	240,834272	180,625704
Wsen- <i>u</i>		270,938556	259,6494495	285,990698	327,384089
FACTOR DE SEGURIDAD		12,41218649	12,98083228	11,6799662	10,0192808

5. CONCLUSIÓN

Dado que todos estos datos han sido analizados a partir de los datos resultantes de los ensayos de rotura uniaxial de laboratorio, hay que considerar que las presiones a las que se sometieron las probetas son mayores que las que se darán en la explotación, aun así los datos resultados del factor de seguridad en la mayoría de los casos son mucho mayores a 1,20 habiendo que considerar el estado de los frentes y del material una vez que se exponga el material y las capas a explotar.

