

PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN CALCALRENTAS BIOCLÁSTICAS: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DATOS DE CAMPO (TALUDES EXISTENTES) Y ENSAYOS DE LABORATORIO.

HERNÁNDEZ DEL POZO, Juan Carlos. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor de la Universidad de Granada.

OCETE RUIZ, Isidro. Ldo. Superior Ciencias Geológicas. Geotécnica del Sur S.A.

JIMÉNEZ, Domingo. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. S.A.C.Y.R.

HERNÁNDEZ GARVAYO, Juan Carlos. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Geotécnica del Sur S.A.

RESUMEN.- En el Sureste de Andalucía y en contacto con los materiales alpujárrides se encuentra una importante bolsa de rocas blandas sedimentarias cementadas, con restos de organismos entre su componentes. Los autores han tenido acceso a los parámetros geotécnicos de los materiales de la zona después de los trabajos realizados para las obras del EDAM de Carboneras. El trabajo que se presenta pretende realizar un análisis comparativo de los parámetros resistentes entre los ensayos de corte realizados con los derivados de los datos tomados en campo sobre los taludes existentes. Los ensayos a compresión simple han dado resultados variables entre 8 y 20 kg/cm², lo que nos habla de la débil cementación que presentan estos materiales. Después de haber tomado más de 100 medidas en campo sobre los taludes existentes hemos podido comprobar que para pendientes suficientemente bajas en el entorno de los 30° a 35° no es significativa la altura. Así mismo hemos podido comprobar la influencia de la edad en las pendiente de equilibrio, conservándose los más recientes en perfecto estado con pendientes muy superiores, lo que nos habla de la erosión de los agentes naturales. El trabajo se cierra con un resumen de los parámetros resistentes obtenidos tanto en pico como en residuales.

INTRODUCCIÓN

La localidad de Carboneras se sitúa al Oeste de la Comunidad Andaluza, dentro de la provincia de Almería. Se Sitúa junto al Parque Natural de Cabo de Gata, mar divina, como reza su eslogan turístico (Figura N°1).

Tanto la localidad como sus alrededores, desde un punto de vista geológico, se enclavan sobre materiales pertenecientes a la Zona Bética junto con otros de diversas cuencas neógenas y cuaternarias y más intrínsecamente, sobre rocas volcánicas que encajan en los materiales neógenos o más antiguos.

Los materiales Béticos pertenecen a tres grandes unidades: Complejo Nevado-Filábride, Complejo Alpujárride y Complejo Maláguide (aunque éste no se hace presente en el sector). Los más próximos lo constituyen los materiales Alpujárrides que afloran hacia el Norte de

Carboneras, constituyendo la Sierra de Cabrera, mientras que los del Complejo Nevado-filábride se cartografían más alejados, hacia la localidad de Lubrin. Tanto uno como otro, son de edad paleozoica y triásica.

Los materiales neógenos y cuaternarios ocupan grandes extensiones dentro de este sector. Son abundantes las calcarenitas bioclásticas (Figura N°2). Éstas son rocas sedimentarias permeables, procedentes de la cementación de la arena. Su dureza y su color dependen del elemento cohesionante, estando en este caso, pobremente cementadas. Presentan, como su nombre indica, restos de organismos entre sus componentes.

Aunque en gran parte estas calcarenitas se encuentran poco cementadas e incluso sueltas, es lógico, independientemente de sus características localizadas y detalladas, considerar a la zona en cuestión como un macizo de tipo rocoso.



Figura N°1.

En gran parte de los casos, este macizo rocoso se encuentra tan altamente fracturado, con unas distancias tan próximas entre las juntas, que los planos de debilidad dividen al conjunto en elementos interconectados entre si por juntas.



Figura N°2.

Este se analiza como si de un medio homogéneo se tratase, con una cohesión y ángulo de rozamiento interno.

De una manera análoga, en el caso de rocas blandas o de suelos duros, el tratamiento a dar debería ser similar, bien definiendo las propiedades resistentes como si de un suelo se tratase o bien suponiendo que se asimila a una roca y deducir sus características resistentes por medio de los métodos citados.

RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES ROCOSOS

GENERALIDADES

La resistencia al corte de las discontinuidades de la roca es el aspecto más importante para determinar la estabilidad del macizo rocoso. Por discontinuidades entendemos los plano de estratificación, las juntas de tensión o cizalladura y la esquistosidad.

Existen dos formas principales de caracterizar la resistencia al corte de los materiales rocosos:

- Definiendo dicha resistencia de las discontinuidades del macizo rocoso.
- Determinación de dicha resistencia, considerando el macizo de un modo global, como si de un material homogéneo se tratase.

Finalmente habrá de plantearse la necesidad de tratar de determinar las características de la resistencia al corte a partir de ensayos de laboratorio y su comparación con los modelos definidos previamente.

RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES PLANAS LISAS

La resistencia pico de una muestra de material rocoso a favor de planos cementados viene dada por la siguiente ecuación: $\tau = c^{(1)} + \sigma \operatorname{tg} \varphi^{(2)}_p$

La resistencia de las juntas no cementadas o ligadas viene dada por: $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi^{(3)}_r$

RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES RUGOSAS

De este modo, desde que una junta se abre, tiene fundamentalmente una resistencia nula para una tensión normal nula. Los ensayos que se realicen para diferentes tensiones normales mostrarán resistencias al corte mayores al incrementar las tensiones normales. Así, para tensiones normales bajas se producen dilatacias y cabalgamientos a lo largo de asperezas de la junta rugosa. Para tensiones normales elevadas se produce el corte a lo largo de todas las asperezas, dado que el trabajo que se necesitaría para cabalgar sobre ellas sería superior al mínimo necesario para romper las propias asperezas y rugosidades de la junta.

De esta forma esta ecuación indica resistencia nula para tensiones normales también nulas.

a.- Criterio de PATTON

Patton sugirió que para representar la resistencia cortante de las juntas rugosas es conveniente una relación no lineal, bilineal como la representada en el cuadro inferior.

b.- Criterio de JAEGER

En la línea de las ideas apuntadas se propuso una ecuación empírica, que varia continuamente, para representar más adecuadamente la resistencia al corte de las discontinuidades rocosas: $\tau = c_j^{(4)} (1 - e^{b^{(5)}\sigma}) + \sigma \operatorname{tg} \varphi_r$

(1) Cohesión o resistencia de la muestra bajo tensión normal nula.

(2) Pendiente de las envolventes de la resistencia pico.

(3) Pendiente de la envolvente de las resistencias residuales.

(4) Resistencia al corte (cohesión) deducible de las rugosidades.

(5) Parámetro empírico de ajuste que puede ser obtenido a partir de los ensayos mediante un ajuste asintótico.

c.- Criterio de LADANYI y ARCHAMBAULT

Considerando las limitaciones de la envolvente bilineal, sugirieron una envolvente curva para reproducir la transición desde los valores deducibles para tensiones bajas hasta los que se obtienen experimentalmente para tensiones elevadas.

d.- Criterio de BARTON

Es el criterio con mayor aceptación. Se basa en la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} [\operatorname{JRC}^{(6)} \log_{10} (\operatorname{JCS}^{(7)} / \sigma) + \varphi_r^{(8)}]$$

El valor de JRC se obtiene mediante el ensayo de inclinación, consistente en obtener el valor del ángulo (α) con el cual se inicia el deslizamiento de una cara con respecto a otra. La tensión efectiva normal (σ'_{no}) viene aplicada por el peso propio de la muestra, dividiéndolo por el área en que actúa, debidamente corregida por medio del coseno del propio ángulo.

$$\operatorname{JRC} = (\alpha - \varphi_r) / (\log (\operatorname{JCS} / \sigma'_{no}))$$

El valor del ángulo de rozamiento residual suele ser menor que el ángulo de rozamiento básico (φ_b) que corresponde a la resistencia de las litoclasas planas sin meteorizar y que se suele obtener mediante el ensayo de inclinación utilizando testigos cilíndricos.

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 r^{(9)}/R^{(10)}$$

Así se ha actuado sobre muestras de las calcarenitas obteniéndose los siguientes resultados:

$$r/R = 0.82$$

$$\varphi_b = 35^\circ$$

De este modo se consigue: $\varphi_r = (35 - 20) + 20 \times 0.82 = 31.4$

RESISTENCIA AL CORTE DEL MACIZO ROCOSO

En la práctica lo que suele importar es la resistencia al corte del macizo rocoso. En general, la rotura se producirá en su mayor parte por las juntas y en otra parte menor, por los "puentes de roca" que producirán una cohesión.

Existen procedimientos que permiten valorar aproximadamente la resistencia al corte de los macizos rocosos sin efectuar ensayo de corte, y que son válidos para cálculos de estabilidad de taludes, considerándolos globalmente en su conjunto. Permiten definir los parámetros c y φ representativos de los mismos al considerar el macizo en su totalidad, como si de un

⁽⁶⁾ Es el coeficiente de rugosidad de la litoclasea (Joint Roughness Coefficient)

⁽⁷⁾ es la resistencia a la compresión de las paredes de la litoclasea (Joint Wall Compresión Strength)

⁽⁸⁾ Ángulo de rozamiento residual

⁽⁹⁾ Rebote Schmidt con la superficie húmeda

⁽¹⁰⁾ Rebote Schmidt con la superficie seca

medio homogéneo se tratase. De este modo se ha realizado la clasificación de las masas rocosas tanto en función del método de Bieniawski (Índice RMR) como del método de Barton (Índice Q).

Como es sabido la clasificación de Bieniawski prevé la valoración de diversos parámetros a los que se atribuye un coeficiente numérico que, en suma, determina el valor del Rock Mass Rating del que deriva la clase a la que pertenece.

La clasificación geomecánica para taludes SMR propuesta por Romana, se obtienen a partir del índice RMR, al que se le resta un factor de ajuste, función de la orientación de las juntas (productor de tres subfactores) y sumando un factor según el método de excavación.

De este modo consideramos como valor de SMR = 59.

Subdivisión en clases de la masa rocosa:

Clase	III
Descripción	discreta
Coficiente numérico total	41-60
Estabilidad	Parcialmente estable
Roturas	Sistemático

Siguiendo estos criterios se pueden estimar los siguientes parámetros resistentes del macizo rocoso:

Angulo de rozamiento interno: 39°
 Cohesión: 3.4 kg/cm²

Parámetros de Barton

El índice Q (Barton) obtenido ha sido de 10.00

Valor	Evaluación
Discreta	4.00-10.00

PARÁMETROS RESISTENTES A PARTIR DE CORRELACIONES

Se puede interpretar el Angulo de rozamiento a partir de una arena típica media del siguiente modo: Puede decirse que 36° corresponde a una arena media típica y los valores secundarios representan correlaciones debidos a los diversos factores que aportan el suelo considerado, de la siguiente manera: $\phi = 36^\circ + \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$, siendo:

- ξ1.- Corrección por la forma del grano.
- ξ2.- Corrección por el tamaño de granos.
- ξ3.- Corrección para las distintas granulometrías.
- ξ4.- Corrección por densidad.

De este modo entendemos estos valores, para la calcarenita suelta entendida como un suelo: $\phi = 40^\circ$

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS RESISTENTES A PARTIR DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Al objeto de conocer los parámetros resistentes de los materiales implicados se han desarrollado dos tipos de ensayos:

- 1º.- Ensayo de corte directo drenado y consolidado.
- 2º.- Ensayo de corte directo residual drenado y consolidado.

Los resultados medios obtenidos han sido los siguientes:

Ensayo	Cohesión (kg/cm ²)	Angulo de rozamiento interno (°)
Ensayo de corte Directo	0.36	46
Ensayo de corte residual	0.00	38.8

El ensayo de corte residual ha consistido en aprovechar la rotura desarrollada a partir del ensayo de corte directo clásico para proceder a generar un nuevo ensayo de corte, en este caso residual, carente de las fuerzas de atracción o cementación que presenta la muestra calcarenítica.

ADOPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO

	Criterios	Angulo de rozamiento básico (ϕ_b)	Angulo residual (ϕ_r)	Cohesión (kg/cm ²)	Angulo Pico (ϕ)
Resistencia al corte de las discontinuidades rugosas.	Criterio de Barton	35°	31.4°	0.0	-
Resistencia al corte de macizos rocosos	Criterio de Bieniawski	-	-	3	39°
Parámetros resistentes a partir de correlaciones	Calcarenitas sueltas (suelo)	-	-	0.0	40°
	Navfac (suelos incoherentes)	-	-	0.0	37°
	Terzaghi y Peck (arenas y limos)	-	-	0.0	45°
Características resistentes a partir de ensayos de laboratorio.	Ensayo de corte residual	-	38.8	0.0	-
	Ensayo de corte directo	-	-	0.36	46°

A la luz de los resultados obtenidos consideramos adecuado adoptar los siguientes parámetros geotécnicos para los materiales calcareníticos referidos:

Parámetros geomecánicos

Qu	15 kg/cm ²
R.Q.D.	50 %

Parámetros resistentes pico

ϕ (pico)	41°
c'	0.36 kg/cm ²

Parámetros resistentes residuales

ϕ (residual)	35°
c'	0.0 kg/cm ²

Parámetros geofísicos

δ natural	1.90 gr/cm ³
δ seca	1.80 gr/cm ³
δ saturada	2.10 gr/cm ³

ESTUDIO DE ESTABILIDAD

INTRODUCCIÓN

En los métodos de cálculo que se aportan a continuación se desarrollan esquemas para determinar la estabilidad de los diferentes taludes ante tipos de rotura desiguales.

Se han desarrollado los estudios de estabilidad para dos casos distintos: *rotura planar* y *deslizamiento circular*, escogidos por ser los más probables en este tipo de materiales en la práctica.

Definimos rotura planar como aquella en la que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana, produciéndose cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. Analizaremos este tipo de movimiento según los criterios de Hoek y Bray.

Se realiza, igualmente, el análisis de estabilidad según rotura circular considerando esta como una superficie de deslizamiento asimilable a una superficie cilíndrica cuya sección transversal se asemeja a un arco de círculo. Este tipo de movimiento se suele producir en terrenos homogéneos, ya sea suelos o rocas altamente fracturadas sin direcciones predominantes de fracturación, en los que además ha de darse la condición de que las partículas de suelo o roca tengan tamaño muy pequeño en comparación con las dimensiones del talud.

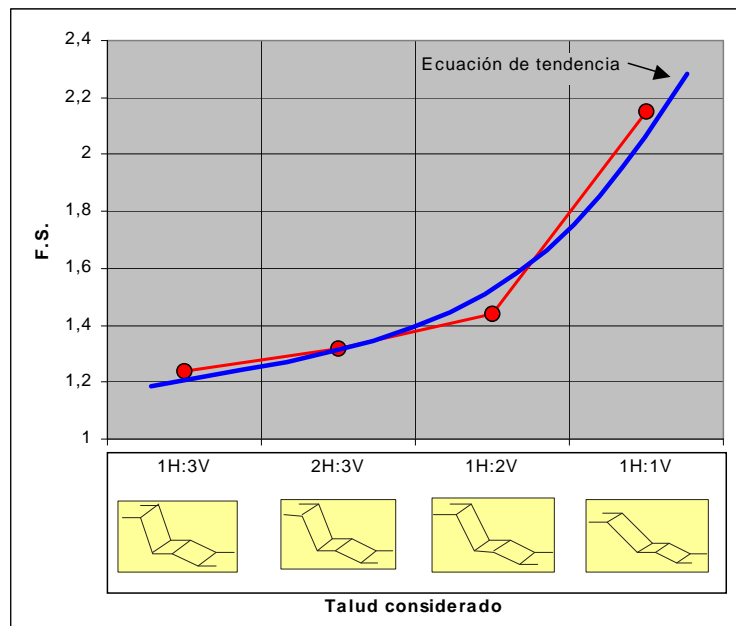


Figura N°3.

Los métodos de cálculo más empleado son los llamados métodos de rebanadas o de dovelas que requieren un cálculo muy laborioso por lo que su utilización se suele hacer mediante sistemas informáticos.

En este esquema se ha utilizado el método Bishop modificado.

SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD A ADOPTAR

Según todos los criterios estudiados y dado que no se considera en los diversos cálculos efectuados el sismo entendemos adecuado optar por un factor de seguridad mínimo al deslizamiento de 1.3.

DESLIZAMIENTOS CIRCULARES

Los resultados obtenidos son los siguientes (Figura N°3):

Relación Horz./Vert.	Altura considerada (m.)	Factor de seguridad
1/3	20	1.24
2/5	20	1.32
1/2	20	1.44
1/1	20	2.15

DESLIZAMIENTOS PLANARES

Para la realización de este análisis se ha seguido el criterio propuesto por Hoek y Bray. El empleo de los ábacos de estos autores requiere realizara las siguientes simplificaciones:

- a.- El talud a estudiar es un plano de inclinación ψ t. La superficie del terreno que queda por encima del talud es un plano horizontal.
- b.- No se considera el efecto sísmico.
- c.- La grieta de tracción es vertical.
- d.- Se supone una distribución triangular en las presiones intersticiales que actúan sobre la base de la masa deslizante y sobre la grieta de tracción. El valor máximo se da, en ambos casos, en la intersección entre las dos superficies.

Los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones realizadas se detallan en la figura N°4, donde se han representado los valores obtenidos de factor de seguridad con respecto a la altura que alcanza el agua en la hipotética grieta de tracción, para unos valores dados de ángulo de la grieta de rotura y altura de dicha grieta.

Se han considerado un total de cuatro simulaciones dependientes del ángulo de rotura y la altura de la grieta de tracción haciendo variable la altura que ocupa el agua dentro de está última.

Los valores más bajos de factor de seguridad se han obtenido en la hipótesis de un ángulo "crítico" de rotura de 50° para una altura de grieta de tracción de 12.06 m.

Esta hipótesis dan valores de factor de seguridad variables entre 1.31 y 0.87 para situaciones entre secas y con altura de agua de 1/3 de la altura total de la grieta de tracción, respectivamente. Dados los materiales implicados, altamente permeables y de índice de poros elevados, es poco probable que el agua pueda alcanzar una altura importante dentro de la supuesta grieta de tracción.

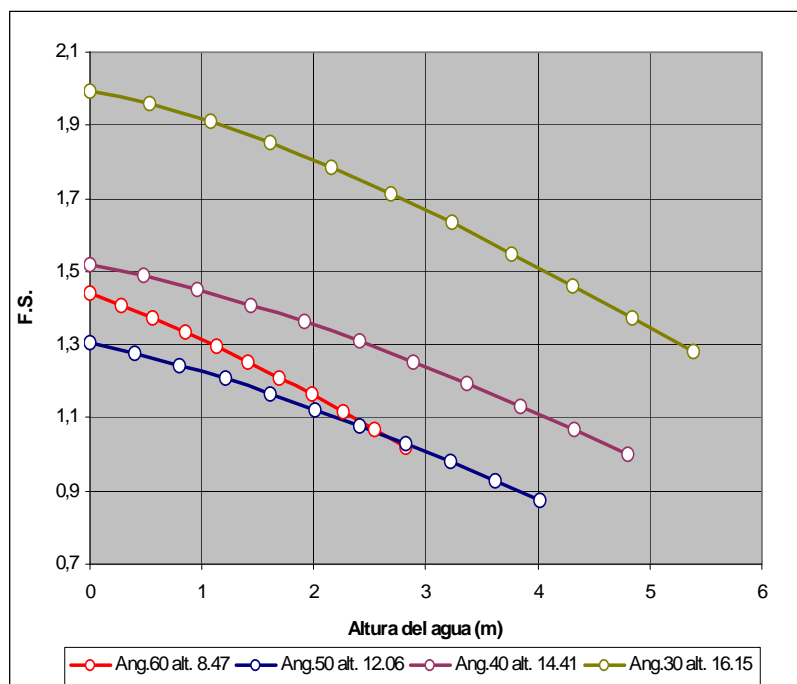


Figura N°4.

Consideramos de este modo como situaciones lógicas de rotura la propiamente secas.

Los coeficientes de seguridad, según este esquema son los siguientes:

Angulo de rotura	60	50	40	30
Altura grieta de tracción	8,47	12,06	14,41	16,15
F.S.	1,44	1,31	1,52	2,00

Según estas consideraciones el mínimo factor de seguridad obtenido de 1.26 se obtiene para ángulos de rotura de 51.9°, según los condicionantes referidos de pendientes 1H:3V, altura de 20 m, condiciones secas y parámetros resistentes pico.

ESTUDIO ESTADÍSTICO A PARTIR DE DATOS DE CAMPO

Se han realizado un seguimiento estadístico de taludes en campo al objeto de definir la tendencia variable entre la altura del talud y el ángulo que forma con la horizontal o pendiente del mismo.

La representación de esta estadística se ofrece en la figura n°5, donde se aporta la tendencia general de la zona.

A partir de estos datos se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Los valores de ángulos de talud obtenidos en campo son siempre inferiores a 45° (1H:1V) salvo para alturas inferiores a 7 m.

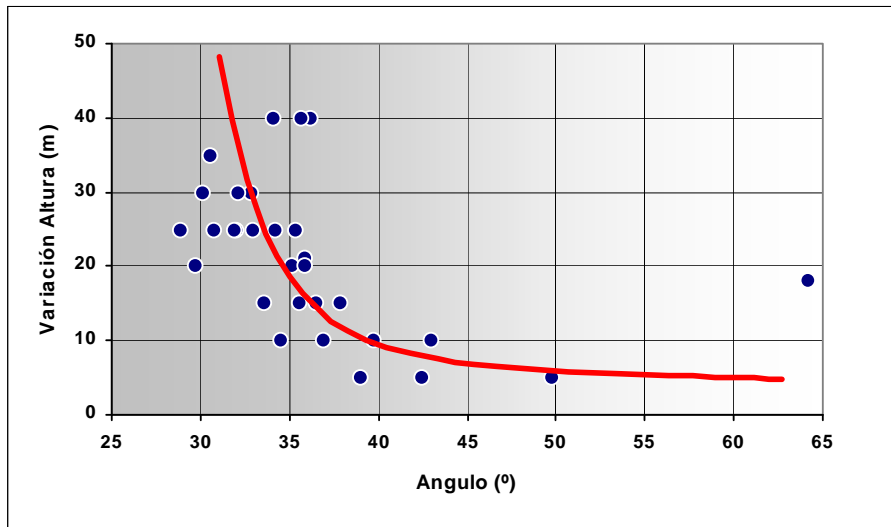


Figura N°5.

- Existe una clara reducción entre los valores obtenidos de cálculo para taludes estables y los propiamente medidos en campo. Este hecho puede venir debido a los frecuentes y abundantes procesos erosivos que ha sufrido la zona a lo largo del tiempo, que tienden a suavizar la morfología y reducir notablemente las pendientes. En cualquier caso, no se han observado en campo procesos dignos de mención en cuanto a deslizamientos, por lo cual la reducción de relación de pendientes referidas deben de achacarse en principio a procesos normales de “desmonte” erosivo.
- Existe un hecho que viene a confirmar lo referido anteriormente y es la existencia de un canal (Figura N°6) que se observa adyacente a la zona en estudio, que presenta taludes con pendientes próximas a los 65° para alturas de 18 m. Este talud artificial se mantiene claramente estable, marcando una neta dispersión con respecto a la tendencia definida por el resto de taludes “naturales” estudiados. Este elevado e inesperado ángulo, claramente discordante con el resto, no ha sufrido procesos erosivos importantes dada su corta vida en comparación con el resto; de este modo su pendiente no ha estado sometida a su reducción natural por dichos procesos.
- Este talud de 65° , para alturas de 18 m viene a definir una pendiente de relación aproximada de 2H:5V, que coincide claramente con el talud estable para coeficientes de seguridad 1.3 obtenidos en cálculo para movimientos circulares y alturas similares.

Relación Horz./Vert.	Altura considerada (m.)	Factor de seguridad
1/3	20	1.24
2/5	20	1.32
1/2	20	1.44
1/1	20	2.15

CONSIDERACIONES FINALES

1. Los materiales implicados en la estabilidad de la zona, están formados en su gran mayoría por calcarenitas bioclásticas de tonos amarillentos crema. Aunque es frecuente que estas calcarenitas se encuentran poco cementadas e incluso sueltas; es lógico, independientemente de sus características localizadas y detalladas, considerar a la zona en cuestión como un macizo de tipo rocoso.
2. El conjunto se analiza como si de un medio homogéneo se tratase, con una cohesión y ángulo de rozamiento interno.
3. A la luz de los resultados obtenidos consideramos adecuado adoptar los siguientes parámetros geotécnicos para los materiales calcareníticos referidos:

Parámetros resistentes pico:

ϕ (pico)	41°
c'	0.36 kg/cm ²

Parámetros resistentes residuales

ϕ (residual)	35°
c'	0.0 kg/cm ²

4. Se han desarrollado los estudios de estabilidad para dos casos distintos: rotura planar y deslizamiento circular, escogidos por ser los más probables en este tipo de materiales en la práctica.
5. Según todos los criterios estudiados, a la hora de adoptar el coeficiente de seguridad adecuado, y dado que no se considera en los diversos cálculos efectuados el sismo, entendemos adecuado optar por un factor de seguridad mínimo al deslizamiento de 1.3.
6. Se ha realizado un seguimiento estadístico de taludes en campo al objeto de definir la tendencia variable entre la altura del talud y el ángulo que forma con la horizontal o pendiente del mismo.
7. Los valores de ángulos de talud obtenidos en campo son siempre inferiores a 45° (1H:1V) salvo para alturas inferiores a 7 m.
8. Existe una clara reducción entre los valores obtenidos de cálculo para taludes estables y los propiamente medidos en campo.
9. Este hecho viene dado por los frecuentes y abundantes procesos de erosión que ha sufrido la zona a lo largo del tiempo, que tienden a suavizar la morfología y reducir notablemente las pendientes.
10. En cualquier caso, no se han observado en campo procesos dignos de mención en cuanto a deslizamientos, por lo cual la reducción de relación de pendientes referidas deben de achacarse en principio a procesos normales de “desmorte” erosivo.

11. Existe un hecho que viene a confirmar lo referido anteriormente y es la existencia de un canal que se observa adyacente a la zona en estudio, que presenta taludes de pendientes próximas a los 65° para alturas de 18 m. Este talud artificial se mantiene claramente estable, marcando una neta dispersión con respecto a la tendencia marcada por el resto de taludes “naturales” estudiados. Este elevado e inesperado ángulo, claramente discordante con el resto, no ha sufrido procesos erosivos importantes, dada su corta vida; de esta forma su pendiente no ha estado sometida a su reducción natural, por dichos procesos.

12. Este talud de 65° , para alturas de 18 m viene a definir una pendiente de relación aproximada de 2H:5V, que coincide claramente con el talud estable para coeficientes de seguridad 1.3 obtenidos en cálculo para movimientos circulares y alturas similares.

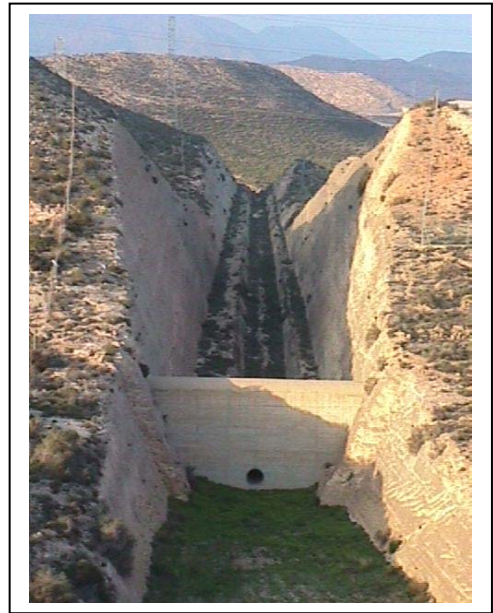


Figura N°6.

BIBLIOGRAFÍA

BARTON N., LIEN R. y LUNDE J. (1974) “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support”. Rock Mechanics. Vol. 6, No. 4., pp 189-236.

ROMANA, M. (1993) “Métodos de corrección de taludes según la clasificación geomecánica SMR” III Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. La Coruña.

ROMANA, M. (1997) “El papel de las clasificaciones geomecánicas en la estabilidad de taludes”. IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada.

AYALA CARCEDO, FJ. (1991) “Manual de ingeniería de taludes”. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales.