

Título: Tratamiento para el estudio y definición de la estabilidad para taludes rocosos de elevado desarrollo: El caso de la Ctra. Nac. 323, en Cambil, Jaén.

Autores

Isidro Ocete Ruiz. Licenciado en Ciencias Geológicas.

Jefe del Departamento de Suelos de Geotécnica del Sur S.A.

Francisco Rubio García. ICCP. Doctorando de la Universidad de Granada.

JC Hernández Garvayo. ICCP. (DEA. Por la Universidad de Granada).

Director Técnico de Geotécnica del Sur. S.A

Ramón García Sánchez. ICCP. (DEA. Por la Universidad de Granada).

Jefe de la Oficina Técnica de Carreteras de la Junta de Andalucía. (Jaén)

Juan Carlos Hernández del Pozo. ICCP. Profesor Titular de Universidad.

Prof. Responsable de Geotecnia y Cimientos de la Universidad de Granada.

Resumen:

No es frecuente encontrar taludes de naturaleza claramente rocosa y de importantes alturas y desarrollos. Son tantos los factores de riesgo que pueden afectar a la estabilidad de estas situaciones que entendemos necesario plantear de un modo claro la sistemática de trabajo para definir un modelo de soluciones que se ajuste claramente a los requerimientos existentes.

La incidencia que se toma de referencia se sitúa en el talud de desmonte ubicado en la A-324 de Córdoba a Almería por Jaén, en el tramo correspondiente de la CN-323 a Cambil.

La sistemática de trabajo se ha desarrollado siguiendo el siguiente esquema:

- a.- Caracterización geotécnica y geológica definida por un macizo rocoso.
- b.- Definición y asignación de parámetros geomecánicos.
- c.- Clasificación de la masa rocosa.
- d.- Estudio y desarrollo estructural.
- e.- Conocimiento y cartografía de los movimientos de caída libre, de vuelco, de rodadura y de deslizamiento.
- f.- Propuesta de soluciones

1 INTRODUCCION

Con poca frecuencia, en las obras de ingeniería, nos encontramos con taludes rocosos de elevada altura e importante pendiente. Cuando esto ocurre, el talud suele tratarse, geotécnicamente hablando, como un macizo rocoso clásico, no encontrándose en la abundante bibliografía existente un modelo o sistemática de trabajo acorde al problema planteado.

En la comunicación que se redacta se propone un proceso secuencial para el estudio adecuado de estas situaciones sobre la base de un problema de esta índole desarrollado en la provincia de Jaén.

2 INCIDENCIA DE REFERENCIA. DATOS INICIALES

La incidencia referida se sitúa en el talud de desmonte situado en la A-324 de Córdoba a Almería por Jaén en el tramo correspondiente a la intersección de la CN-323 a Cambil.

El tramo al que se refiere discurre a media ladera formando un talud de una altura máxima de 50 m. y con una pendiente aproximada de 1H:1V, con tres bermas distribuidas a lo largo de todo el talud.

En los taludes se observa una erosión diferencial que se concentra en unos estratos y en otros es menos importante o casi ausente.

El talud existente está constituido por dolomías de tonos cremas con intercalaciones de niveles de arcillas marrón grisáceas.

La erosión diferencial referida entre los distintos materiales se pone de manifiesto en un material arcilloso que sufre una erosión más acusada que las rocas dolomíticas.

Esta situación junto con la existencia de un intenso diaclasado ha generado la caída de abundantes rocas con el consiguiente peligro.



Fig.1.- Vista de la situación actual del desmonte situado en la carretera A-324 correspondiente a la intersección de la CN-323 dirección Cambil.

En ellas puede observarse la colocación, aun sin terminar, de una malla para proteger la caída de bloques.

3 ENTORNO GEOLOGICO

Desde el punto de vista geológico el área estudiada, así como sus alrededores, se ubica sobre un gran afloramiento de edad triásica rodeado de material de naturaleza olistostrómica.

Dicha secuencia estratigráfica triásica comienza hacia su base con unas lutitas rojas y areniscas, ocupando el núcleo de una estructura anticlinal. Este tipo de material puede intercalar niveles, de hasta 10 m. de potencia, de areniscas de grano grueso y tonalidades ocres. Sobre dichos materiales se localiza un paquete de yesos laminados. A modo de dique, intruye sobre los materiales anteriores unas ofitas.

Sobre los yesos descritos con anterioridad, o bien directamente sobre las lutitas rojas, descansa un nivel carbonatado con potencias próximas a 100 m. cuyo afloramiento se puede apreciar en las inmediaciones de la carretera N-342. En este punto, el tramo lo forman unas calizas y dolomías de tonalidades grises oscuras a negras; se organizan en ciclos, de estratificación tableada o semimasiva.

El techo de todo este conjunto triásico viene dado por una alternancia cíclica de margas, lutitas y areniscas de tonalidades variadas, fundamentalmente rojo, verde y ocre, que se encuentran muy tectonizado.

Alrededor de todos estos materiales triásicos se ha cartografiado la unidad olistostrómica del Neógeno Inferior, constituida mayoritariamente por elementos de procedencia triásica y en los que se engloban masas de diversos tamaños y litologías, de edades comprendidas entre el Jurásico y el Mioceno inferior. Los materiales más modernos (Cuaternario) están ligados a la denudación de los fuertes relieves subbéticos, o deposición de los actuales ríos.

4 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

El reconocimiento de campo ha definido una secuencia de materiales definidos, de techo a muro, por:

- a.- Macizo rocoso dolomítico, ocasionalmente con algún nivel margoso.
- b.- Alternancias de niveles dolomíticos con niveles margosos.

5 ESTUDIO ESTRUCTURAL

Igualmente se ha realizado un estudio estructural de los estratos detectado al objeto de determinar la tendencia de estos frente a la ladera.

La proyección estereográfica proporciona una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería geológica. Su principal interés estriba en el hecho de que con ella podemos representar orientaciones (dirección) e inclinación (buzamiento o inmersión) preferentes de elementos que en la naturaleza no se presentan con desarrollos geométricos perfectos, como es el caso de un estrato, donde el plano de techo y de muro presentan irregularidades puntuales aunque con una tendencia general.

Además este tipo de representación permite medir los ángulos de forma directa.

Entre sus aplicaciones más importantes se encuentra el reconocimiento de juegos de diaclasas en un afloramiento rocoso, la determinación de la dirección y el buzamiento de un estrato, la determinación del tipo de rotura en un movimiento de ladera, etc.

En la representación siguiente se detallan los planos obtenidos, representando además de éstos, los polos que los definen.

Se puede observar la existencia neta de dos familias de planos o juntas que representan dos planos mayores, que han sido los considerados a la hora de clasificar geomecánicamente el macizo rocoso.

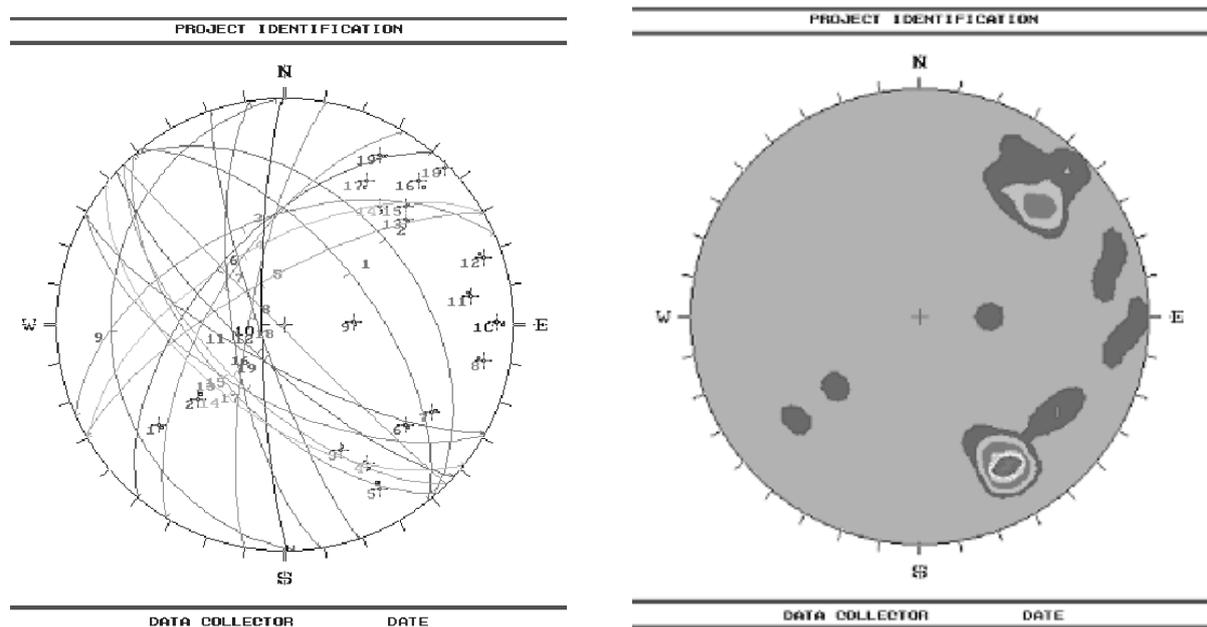


Fig.2

En la nube de puntos obtenida se han representado los planos mayores obtenidos y que definen dos familias:

Familia N°1.- Dirección N 241 E, buzamiento 65 E

Familia N°2.- Dirección N 137 E, buzamiento 62 E

6 ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES

Los criterios adoptados para la determinación de los parámetros resistentes han sido los de rotura propuesto por Hoek y Brown y la equivalente de Mohr-Coulomb.

El parámetro m_i se define según el tipo de roca, clase, grupo y textura para el cual se ha adoptado el valor adimensional de 9, atendiendo a su definición como rocas sedimentarias no clásticas, carbonatadas y de textura muy fina.

Para el parámetro GSI (*Geological Strength Index*) dependiente de las características estructurales de la roca considerada, se ha estimado un valor de 65, que define rocas diaclasadas de características aceptables.

Finalmente, se ha adoptado un valor de resistencia de 10 Mpa obtenido a partir del Martillo de Schmidt.

Los valores obtenidos según estos criterios han sido:

a.- Ángulo de rozamiento de 34.01°

b.- Cohesión de 0.72 Mpa.

La representación gráfica de los valores obtenidos según los criterios de los autores propuestos es la siguiente:

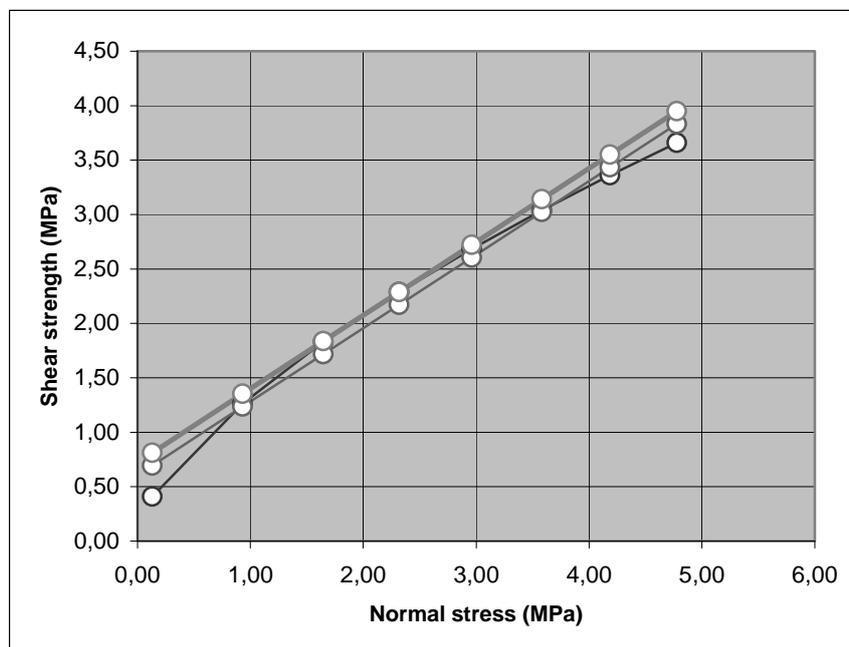


Fig.3

6 CLASIFICACIÓN DE LA MASA ROCOSA

En esta secuencia del trabajo se realizó 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.

Los parámetros cuyo conocimiento es necesario para la determinación del índice de Bieniawski son los siguientes:

- Resistencia a la compresión monoaxial de la roca intacta
- Calidad de la masa rocosa mediante el índice de recuperación porcentual modificado (RQD)
- Espaciado entre discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades
- Flujo de agua
- Orientación de las discontinuidades respecto a la orientación de excavación

A cada uno de estos parámetros se le debe atribuir un valor, al que le corresponde un coeficiente numérico; la suma de tales coeficientes lleva a la determinación del índice RMR del que deriva la clase a la que pertenece la roca.

La clasificación propuesta por Barton se basa en la valoración de seis parámetros:

- valor del RQD: índice de recuperación porcentual modificado
- número de sistemas o discontinuidades
- rugosidad de las discontinuidades
- grado de alteración de las caras de las fracturas y eventual presencia de materiales de relleno
- condiciones hidráulicas
- factor de reducción por las condiciones de carga litostática

El índice Q de calidad de la roca del que deriva la clasificación de Barton se expresa mediante la relación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Basándose en el valor de Q obtenido la roca se puede clasificar en nueve niveles de calidad distintos.

A.- Clasificación de Bieniawski del macizo en estudio:

Parámetros de clasificación	Rango de valores						
Resistencia de la roca sana	15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)	20	17	13	8	3		
Separación entre juntas	30	25	20	10	5		
Estado de las juntas	30	25	20	10	0		
Agua freática en las juntas	15	12	7	4	0		
Orientación de las discontinuidades respecto a la dirección de excavación	0	-5	-25	-50	-60		

Tabla. 1

El valor obtenido es de 61.

Subdivisión en clases de la masa rocosa

Clase	I	II	III	IV	V
Descripción	óptima	buena	discreta	pobre	muy pobre
Coficiente numérico total	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Estabilidad	Totalmente estable	Estable	Parcialmente estable	Inestable	Totalmente inestable
Roturas	Ninguna	Ocasional	Sistemático	Juntas o grandes cuñas	Grandes roturas por planos continuos

Tabla.2

De este modo se puede definir las clases de sostenimiento en función de los valores del MRM:

CLASES DE SOSTENIMIENTO	VALORES SMR
Sin sostenimiento: Ninguna, Saneo	65 < SMR
Protección: Zanjas de pie, Vallas, de pie o de talud Redes, sobre la superficie del talud	45 < SMR < 70
Refuerzo: Bulones, Anclaje	30 < SMR < 75
Hormigón: Gunita, Hormigón dental. Contrafuerte y/o vigas, Muros de pie	20 < SMR < 60
Drenaje: Superficial, Profundo	10 < SMR < 40
Reexcavación: Tendido, Muros de contención	10 < SMR < 30

Tabla.3

B.- Clasificación de Barton del macizo estudiado:

- Valor de RQD (%) 80
- Jn - Número de sistemas o discontinuidades. Tres sistemas. Valor 9
- Jr - Rugosidad de las discontinuidades. Rugosas y Onduladas. Valor 10
- Ja - Relleno y alteración de las caras de las fracturas. Solo Oxidación. Valor 1
- Jw - Condiciones hidráulicas. Seco. Valor 1
- Factor de reducción por las condiciones de carga litoestática. Rocas suelta con fracturas abiertas. Valor 5

El valor de Q aplicando la ecuación de Barton es de 18. Indicativo de una evolución del macizo rocoso como *Bueno*.

Evaluación	Valor
Excepcionalmente mala	<0.01
Extraordin. malo	0.01-0.10
Muy pobre	0.10-1.00
Pobre	1.00-4.00
Discreta	4.00-10.00
Buena	10.00-40.00
Muy buena	40.00-100.00
Extraordinariamente buena	100.00-400.00
Excepcionalmente buena	400.00-1000.00

Tabla. 4

7 MOVIMIENTOS EN CAÍDA LIBRE, DE VUELCO, DE RUEDO Y DE DESLIZAMIENTO

Para la simulación de caída de rocas que se pueda producir se han utilizado el método llamado Lumped Mass y CRSP.

Para el modelo Lumped Mass las hipótesis de cálculo son: esquema plano, perfil del talud semejante a una fracción constituida por segmentos rectilíneos, bloque puntiforme y resistencia del aire.

El Modelo CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) ha sido desarrollado por Pfeiffer y Bowen (1989) con el objetivo de modelar el movimiento de la caída de bloques de roca en forma de esfera, cilindro o disco, con sección circular, en el plano vertical del movimiento.

Para describir el movimiento de los bloques, el modelo CRSP aplica la ecuación del movimiento parabólico de un cuerpo en caída libre y el principio de conservación de la energía total.

El fenómeno del impacto se modela utilizando como sucesivos parámetros, con respecto al método Lumped mass, la rugosidad del talud y la dimensión de los bloques de roca. En particular el modelo CRSP asume que el ángulo formado entre la dirección del bloque y el perfil del talud cambia según una estadística que se debe definir para cada caso analizado.

El modelo trata, por lo tanto, en modo estadístico también los resultados de las velocidades y las alturas de vuelco alcanzadas por el bloque de rocas, con respecto a la superficie del talud, durante la caída.

El modelo considera por consiguiente las combinaciones de los movimientos en caída libre, de vuelco, de ruedo y de deslizamiento, que pueden variar a según de las dimensiones de los bloques y de la rugosidad del talud.

Al objeto de determinar los parámetros que definen el encabezado de este apartado se ha partido de un perfil desarrollado según la topográfica de la zona en estudio.

Para definir el tipo y características de las rocas a considerar se ha estimado el siguiente modelo:

The image shows a software configuration window for the CRSP model, divided into several sections for defining rock block parameters and analysis options.

- Roca:** A list of input fields for rock properties:
 - Peso bloque de roca (Kg/m³): 2200
 - Módulo de elasticidad (Kg/cm²): 75000
 - Velocidad inicial en x (m/s): 3
 - Velocidad inicial en y (m/s): -3
 - Velocidad límite de parada (m/s): 0,01
 - Abcisa posición inicial roca (m): 0
 - Ordenada posición inicial roca (m): 1
 - Abcisa final roca (m): 0
 - Número de lanzamientos: 5
- Tipo de análisis:** Radio buttons for:
 - Análisis estadístico
 - Análisis determinístico
- Lanzamientos:** Radio buttons for:
 - Lanzamiento
 - Zona de lanzamientos
- Forma bloque de roca:** Radio buttons for:
 - Disco
 - Esférico
 - Cilíndrico
- Disco:** Input fields for:
 - Diámetro disco (m): 2
 - Espesor disco (m): 3
- Cilíndrico:** Input fields for:
 - Diámetro cilindro (m): 2
 - Altura cilindro (m): 3
- Esférico:** Input field for:
 - Diámetro (m): 2

Fig.4

Igualmente ha sido necesario definir una barrera existente en el arcen de la carretera. Los valores que se han estimado para la barrera observada son los siguientes:

Altura.- 2 mtrs.

Angulo.- 90°

Energía.- 250 Kj

El método utilizado es el CRSP. Los valores obtenidos de estos cálculos son los siguientes:

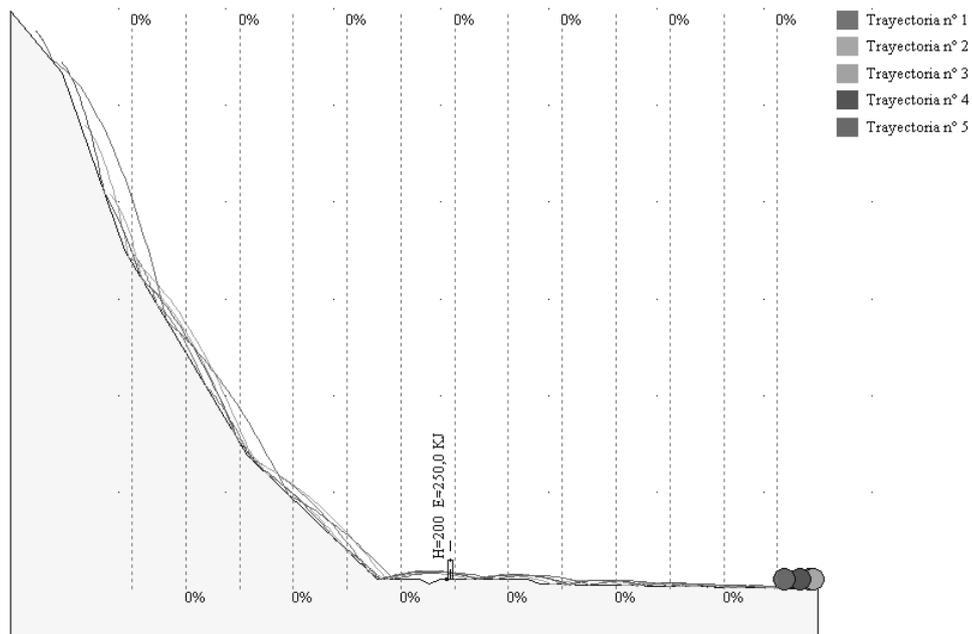


Fig.5

Se ha realizado un tanteo de las rocas que serían, según las consideraciones realizadas, retenidas por la barrera existente en comparación con el tamaño de dichas rocas, considerándolas como esféricas.

Según los cálculos realizados, la barrera solo podría asumir caídas de rocas que no superaran un diámetro de 1.15 m.

Dado que se ha observado, principalmente, en la zona más elevada del talud donde se están desarrollando los trabajos, bloque sensiblemente mayores a los referidos en la página anterior, es necesario realizar medidas de anclado de dichas rocas al objeto de garantizar su estabilidad.

8 PROPUESTA DE SOLUCIONES

En la zona más deteriorada se entendió como imprescindible la ejecución de anclajes de barra o bulones. Estos mecanismos son aquellos en los que el elemento tensor está compuesto por una barra de acero provista de un doble perfil de rosca laminada en caliente.

Para los aceros de calidad ST 85/105 se realiza además un estirado en frío posterior (Dywidag).

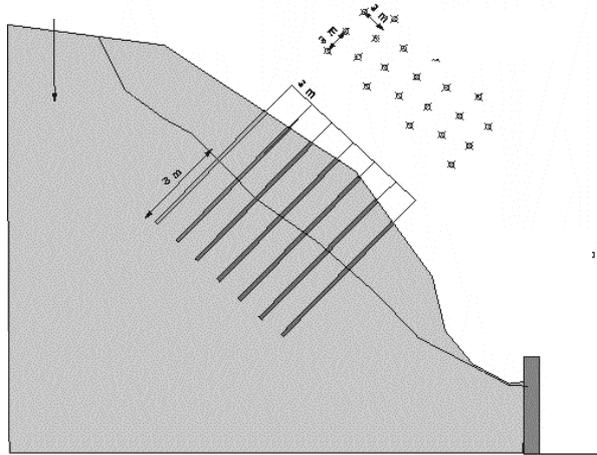


Fig.6

Según las consideraciones realizadas será necesario que los bulones referidos tengan al menos una longitud inyectada de 3 mtrs en la roca sana, situado en retícula de separación de 3 x 3 m, y situados al tresbolillo.

El sector habrá de verse apoyado por la colocación de una malla de cable para su posterior gunitado.

Como medidas complementarios se plantearon la ejecución de un muro de hormigón en el sector inferior de la zona

estudiada y coincidente con la zona desprendida, que funcione como contención de tierras y a modo de barrera, de tal forma que quede debidamente cimentado en los materiales rocosos y quedando al menos 1m en bandera.

9 CONCLUSIONES

Entendemos que en situaciones como la planteada, para el conocimiento geotécnico de un talud de altas dimensiones de naturaleza rocosa, es imprescindible proceder de un modo lógico y sistemático.

La sistemática de trabajo se ha desarrollado siguiendo el siguiente esquema:

a.- **Caracterización geotécnica y geológica** definida por un macizo rocoso. Es imprescindible encuadrar, geológicamente hablando, el macizo rocoso para conocer sus características generales de origen, composición y estructura. Este estudio puede incluso verse enriquecido por el conocimiento estadístico en el mismo encuadre geológico.

b.- Definición y **asignación de parámetros** geomecánicos al macizo rocoso. A partir, en general, de sencillos mecanismos de reconocimiento se deben definir los parámetros de los materiales para la definición de los cálculos necesarios.

c.- **Clasificación de la masa rocosa.** A partir de los modelos clásicos de estas clasificaciones es posible obtener una definición bastante aproximada de las medidas a realizar.

d.- **Estudio y desarrollo estructural.** Las características estructurales del macizo rocoso habrán de ser uno de los parámetros más significativos a la hora de determinar las condiciones de estabilidad, siendo imprescindible a la hora de realizar un estudio de este tipo.

e.- Conocimiento y cartografía de los **movimientos de caída libre, de vuelco, de rodadura y de deslizamiento.** Para este estudio proponemos como más adecuado el Modelo CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) el cual aplica la ecuación del movimiento parabólico de un cuerpo en caída libre y el principio de conservación de la energía total. El modelo considera las combinaciones de los movimientos en caída libre, de vuelco, de ruedo y de deslizamiento.

f.- Propuesta de **soluciones**, definidas por las características, parámetros resistentes, y conocimiento del macizo rocoso en su conjunto así como de los problemas puntales existentes.

10 BIBLIOGRAFÍA

- BARTON N. y CHRYSSANTHAKIS P. (1974) "Design of tunnels for NMT using fibre reinforced shotcrete and bolting as permanent support". Proc. 2nd Int. Symp. on Sprayed concrete. Gol. Noruega. Pp 15-30.
- 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.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989) "Engineering Rock Mass Classifications" Wiley. Nueva York.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, JC., OCETE RUIZ, I., HERNÁNDEZ GARVAYO, JC. Y MUÑOZ MUÑOZ, F. (2001).: "Análisis comparado de estabilidad de taludes en rocas blandas". V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. (Madrid, Noviembre 2001).
- 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.
- SCHACH R., GARSHOL K. y HELTZEN A.M. (1979) "Rock bolting. A practical hand book". Pergamon. Londres.