

INGENIERÍA DEL TERRENO

Ingeoter 5

capítulo 6

UNA NUEVA APROXIMACIÓN A LA CLASIFICACIÓN PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES (SSPC)

Robert HACK. Centre for Technical Geosciences, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Delft. The Netherlands.

David PRICE (t). Centre for Technical Geosciences, Technical University Delft. The Netherlands.

Niek RENGERS Centre for Technical Geosciences, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Delft. The Netherlands.

MADRID
2005

U.D. Proyectos
E.T.S.I. Minas - Universidad Politécnica de Madrid
Ríos Rosas, 21
28003 MADRID

Teléf. 91 336 7006
Fax 91 336 7006
e-mail: proy@dermos.upm.es

Otras obras de interés:

- Manual de Túneles y Obras Subterráneas.
- Manual de Áridos. Prospección, Explotación y Aplicaciones.
- Manual de Rocas Ornamentales. Prospección, Explotación, Elaboración y Colocación.
- Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras.
- Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes.
- Manual de Técnicas de Mejora del Terreno.
- Manual de Sondeos. Tecnología de Perforación.
- Manual de Sondeos. Aplicaciones.
- Manual de Evaluación de Yacimientos Minerales.
- Manual de Geología y Prospección de Yacimientos Minerales
- Manual de Aplicaciones Informáticas en Minería.
- Manual de Equipos de Dragado.
- Manual de Perforación Dirigida Horizontal. Tecnología sin Zanjas.
- Manual de Geosintéticos en la Construcción de Muros y Terraplenes.
- Manual de Perforación y Voladura de Rocas.
- Manual de Diseño y Construcción de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos.
- Manual de Anclajes en Ingeniería Civil.
- Manual de Restauración de Terrenos y Gestión Ambiental
- Ingeoter. Libros 1, 2, 3 y 4.
- Ingeotúneles. Libros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y 8.
- Guía para el Control del Ruido Ambiental en Canteras y Graveras.
- Guía para el Control y Prevención del Polvo en Canteras y Graveras.
- Recursos Minerales.

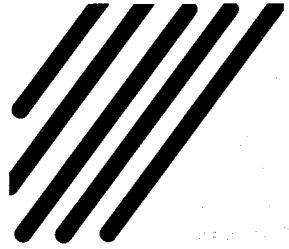
- TALUDMIN. Programa de caracterización geomecánica de taludes.
- DEGTALUD. Programa para evaluar la degradación potencial de taludes rocosos.
- MINESCOM. Programa de evaluación de estabilidad de escombreras.
- DISVOL. Programa de diseño de voladuras.
- CORROSIM. Programa de evaluación de la corrosión en ambientes subterráneos.
- TRANSMIN. Programa de simulación del transporte con volquetes.
- TOPOMIN. Programa de estimación de rendimientos y costes de excavación de túneles.

© Prohibida la reproducción total o parcial sin el consentimiento de los autores.

I.S.B.N.: 84-96140-14-8
Depósito Legal: M. 31.111-2005
Obra Completa: 84-96140-12-1

Imprime: Gráficas Arias Montano, S. A.
28935 MÓSTOLES (Madrid)

capítulo 6



Robert HACK. Centre for Technical Geosciences, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Delft. The Netherlands.

David PRICE (t). Centre for Technical Geosciences, Technical University Delft. The Netherlands.

Niek RENGERS Centre for Technical Geosciences, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Delft. The Netherlands.

UNA NUEVA APROXIMACIÓN A LA CLASIFICACIÓN PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES (SSPC)

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el conocimiento del comportamiento de los macizos rocosos se ha desarrollado tremendamente. En la construcción, así como en la excavación de taludes, cimentaciones y túneles superficiales se ha comprobado que las discontinuidades tienen una gran influencia sobre las propiedades mecánicas de los macizos rocosos.

Esta percepción ha tenido consecuencias en la evaluación del comportamiento ingenieril de un macizo rocoso. Sin embargo, las variaciones en las propiedades pueden ser considerables a lo largo de los mismos planos

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

de discontinuidad. Como puede haber cientos de discontinuidades en un macizo rocoso, cada una con sus propias propiedades variables, éstas, tomadas junto con las heterogeneidades en el material rocoso, requieren que con el fin de descubrir o calcular con precisión el comportamiento mecánico del macizo rocoso, se necesite una gran cantidad de datos. Para obtener las propiedades de las discontinuidades pueden usarse ensayos de campo y de laboratorio. Los ensayos en gran número consumen, sin embargo, mucho tiempo y molestias.

Los cálculos numéricos de "bloques discretos" discontinuos pueden modelar las discontinuidades y calcular el comportamiento de un macizo rocoso con todo detalle, proporcionando esos datos de propiedades haciéndolos disponibles. Aparte se necesita tener ordenadores muy potentes para hacer un gran número de cálculos requeridos por la vasta cantidad de discontinuidades, los datos de ensayos necesitados para un cálculo discontinuo numérico no están nunca disponibles. Una práctica aplicada frecuentemente para evitar estos problemas es simplificar el modelo de discontinuidades, y estimar o suponer las propiedades o usar valores recogidos en la literatura. Hasta que punto el resultado es representativo de la situación real, es una pregunta que frecuentemente permanece sin contestar.

2. SISTEMAS EXISTENTES DE CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS PARA TALUDES

Existe un conjunto de diferentes aproximaciones para evaluar el comportamiento de un macizo rocoso que es el constituido por la clasificación de éstos. En un sistema de clasificación son combinadas, para proporcionar un método de diseño de estructuras ingenieril en o sobre un macizo rocoso, relaciones empíricas entre las propiedades del macizo y el comportamiento de dicho macizo rocoso en relación a una aplicación ingenieril particular.

La clasificación de macizos rocosos ha sido aplicada con éxito durante años en túneles y minería subterránea (Barton, 1976, 1988; Bieniawski, 1989; Laubscher, 1990). Algunos sistemas de clasificación de macizos rocosos desarrollados originalmente para excavaciones subterráneas han sido utilizados en taludes (Barton, Lien & Lunde, 1974; Bieniawski, 1989) o han sido modificados para taludes (Haines & Terbrugge, 1991; Romana, 1985, 1991; Selby, 1980, 1982). Un sistema diseñado específicamente para evaluar la estabilidad de taludes ha sido desarrollado por Shuk (1994).

Los parámetros y métodos de cálculo de los sistemas de clasificación de estabilidad de taludes existentes han sido analizados y los diferentes sistemas han sido usados para establecer la estabilidad de taludes existentes (Hack, 1998). Generalmente, todos los sistemas incluyen parámetros de la geometría del talud, resistencia de la roca intacta, espaciamiento entre discontinuidades, o tamaño de bloque, y parámetros relacionados con la resistencia al corte a lo largo de discontinuidades.

Algunos sistemas incluyen la presencia de agua o presiones del agua, deformación de la roca y del macizo rocoso, susceptibilidad a la meteorización, y método de excavación.

El uso de los sistemas de clasificación existentes ha mostrado que algunos parámetros son difíciles o imposible de medir (por ejemplo, la presión del agua y la deformación de los macizos rocosos). Muchos sistemas presentan la estabilidad final como un simple valor numérico con una descripción (Barton et al., 1974; Barton, 1976; Bieniawski, 1989; Haines & Terbrugge, 1991; Selby, 1980, 1982). Éstos dan resultados que son difíciles de apreciar. Además de los parámetros que influyen en la calificación de estabilidad de un

talud existen mecanismos físicos, que son independientes de esos parámetros, que pueden causar la inestabilidad. Por ejemplo, la resistencia de la roca intacta es utilizada para calcular la calificación de estabilidad mientras que un talud es inestable debido al deslizamiento a lo largo de una discontinuidad que está rellena de arcilla. Por esto, la resistencia de la roca intacta no tiene ninguna importancia para la estabilidad o inestabilidad de ese talud.

3. UNA NUEVA APROXIMACIÓN: CLASIFICACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES (SSPC. SLOPE STABILITY PROBABILITY CLASSIFICATION)

En los sistemas de clasificación de macizos rocosos existentes están también ausentes expresiones para establecer la incertidumbre de las propiedades de los macizos rocosos y variaciones de éstas (Nilsen, 2000) y la aplicabilidad de los métodos de cálculo, mientras que hay una importancia inminente en el establecimiento de la seguridad de un talud diseñado. Otro problema importante identificado en los sistemas existentes es que generalmente no se establece una diferenciación entre el macizo rocoso expuesto usado para la clasificación y el macizo rocoso en que va a ser hecho el talud. Factores locales tales como la meteorización y el método de excavación pueden causar las principales diferencias. El tipo de rotura de taludes por desmoronamiento (*ravelling*) no es considerado tampoco en los sistemas de clasificación, mientras que la clasificación del macizo rocoso es la única opción variable para predecir el tipo de rotura por desmoronamiento (Maerz, 2000).

Por estas razones y por los resultados insatisfactorios obtenidos generalmente con los sistemas de clasificación de macizos rocosos existentes, se ha desarrollado un nuevo sistema de clasificación para evaluar la estabilidad de los taludes (Hack, 1998). El concepto de este nuevo sistema desarrollado se basa en:

- a) La introducción del principio de un sistema de clasificación en tres etapas para describir: el macizo rocoso "expuesto", de "referencia" y del "talud".
- b) La evaluación de la estabilidad por la probabilidad de ocurrencia de diferentes mecanismos de rotura en lugar de por un simple valor de clasificación.
- c) Procedimientos simples y carentes de ambigüedad para la recopilación de datos en campo.

4. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN EN TRES ETAPAS

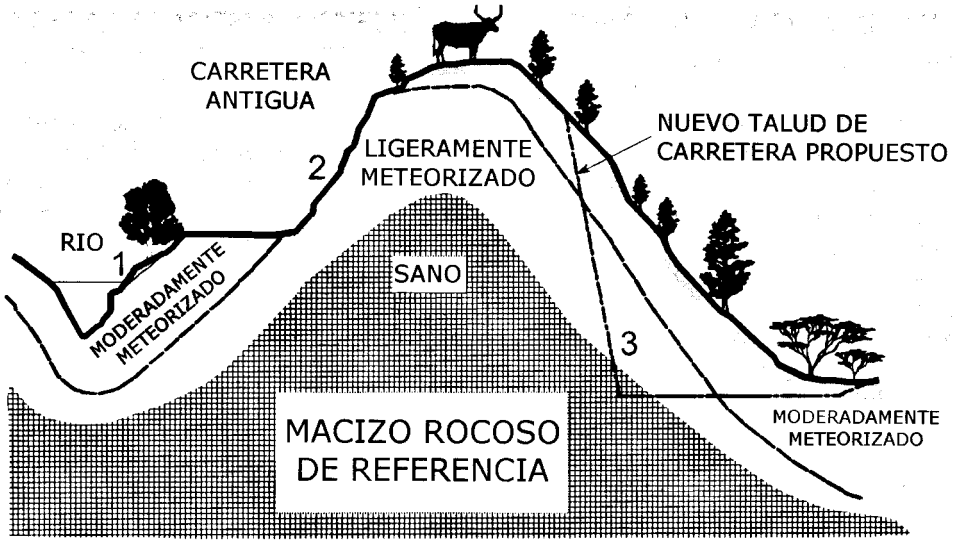
El sistema SSPC considera tres macizos rocosos:

- 1) El "macizo rocoso expuesto", ERM (*Exposure Rock Mass*).
- 2) El macizo rocoso en unas condiciones imaginarias sin alteración ni meteorización antes de la excavación, "macizo rocoso de referencia", RRM (*Reference Rock Mass*).
- 3) El macizo rocoso en el que el talud existente o el nuevo está siendo situado, el "macizo rocoso del talud", SRM (*Slope Rock Mass*).

Los parámetros del macizo rocoso de importancia son descritos y caracterizados en un frente expuesto, resultante del "macizo rocoso expuesto".

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

Los factores locales de influencia sobre los parámetros medidos en el frente expuesto, tales como meteorización o alteración debida al método de excavación usado para crear el frente expuesto son tenidos en cuenta. Éstos convierten los parámetros del ERM a aquellos del macizo rocoso sano teórico, Fig. 1, que existe bajo la zona de influencia de la meteorización y otras alteraciones "macizo rocoso de referencia", RRM.



1. LADERA NATURAL EXPUESTA RESULTANTE DEL DISCURRIR DEL RIO, MODERADAMENTE METEORIZADA
2. CARRETERA ANTIGUA, HECHA POR EXCAVADORA, MACIZO LIGERAMENTE METEORIZADO
3. TALUD NUEVO DE CARRETERA A EXCAVAR MEDIANTE VOLADURA, MACIZO MODERADAMENTE METEORIZADO A SANO

Figura 1. Esquema de los macizos rocosos expuestos con varios grados de meteorización y diferentes tipos de excavación, y representación del concepto de "macizo rocoso de referencia".

Esta conversión es hecha con la ayuda de parámetros de conversión: parámetros específicos de exposición, Fig. 2. Mediante esta técnica, los parámetros del material en la misma unidad geotécnica que muestra diferentes grados de meteorización y diferentes grados de alteración por excavación son traídos retrospectivamente a parámetros que reflejen sus propiedades geotécnicas básicas originales.

La evaluación de la estabilidad real es hecha en el "macizo rocoso del talud", SRM. Éste es deducido a partir del "macizo rocoso de referencia", RRM, mediante ajuste de los parámetros del RRM con los parámetros específicos del talud. Los parámetros específicos del talud son parámetros de corrección para tener en cuenta la influencia de la futura meteorización en la vida ingenieril del talud y la influencia del método de excavación empleado. El ERM y el SRM son los mismos si un talud existente es examinado y no es considerada la futura meteorización.

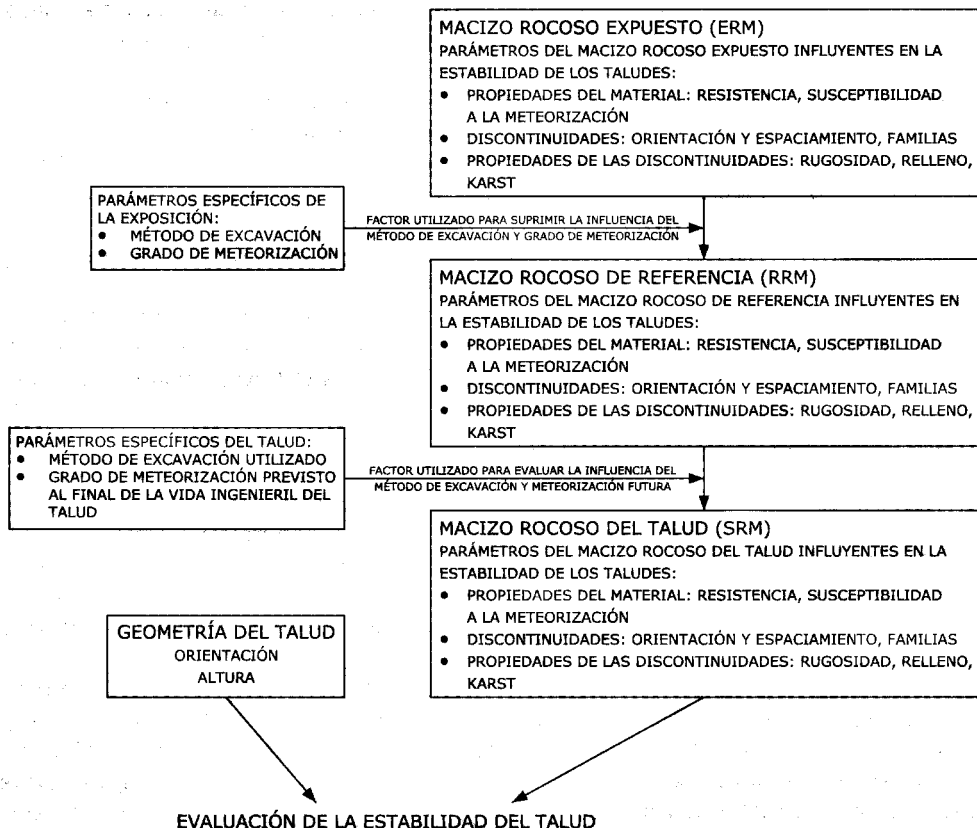


Figura 2. Flujograma del concepto de tres etapas del sistema SSPC.

5. ÁREA DE INVESTIGACIÓN

La investigación para el desarrollo del sistema de clasificación fue hecha en el entorno de Falset en el nordeste de España, en la provincia de Tarragona. El área es particularmente adecuada para este tipo de investigaciones al haber una gran variación en la geología, litología y ambientes tectónicos, dando lugar a diferentes ambientes geológicos para el desarrollo del sistema de clasificación.

Las rocas en el área de Falset varían desde los conglomerados Terciarios a las pizarras del Carbonífero e incluyen rocas conteniendo yesos, lutitas, granodioritas, calizas y areniscas. La topografía es montañosa y la vegetación limitada, de manera que existen grandes superficies de rocas aflorantes. Además, existen numerosas carreteras antiguas (construidas hace 40 a 60 años) y diversas carreteras que se han construido recientemente con numerosas excavaciones en las que se han utilizado diferentes técnicas. Los taludes antiguos y los nuevos han sido diseñados excavados de manera poco adecuada, resultando diversos problemas de inestabilidad a lo largo del tiempo. La altura de los taludes en los cortes se encuentra

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

normalmente entre los 5 y los 25 m con una altura máxima de 45 m. Esto ha permitido una comparación tanto de los taludes que permanecen estables con el tiempo y los métodos de excavación así como una evaluación de la influencia de la meteorización y los métodos de excavación.

El clima en el Falset es Mediterráneo, caracterizado por veranos secos y calurosos (temperaturas en el intervalo de ≈ 15 a 35 °C) e inviernos suaves (10 a 15°). Parte del área es montañosa, en el rango de los 120 m aproximadamente sobre el nivel del mar. Los ríos y arroyos en el área están secos desde Marzo a Octubre, pero puede llover durante largos periodos, durante el verano e incluso en Abril, aunque esto no es típico.

Algunas veces las lluvias son torrenciales. Ocasionalmente, las temperaturas bajo cero ocurren pero las nevadas en el área son raras.

6. DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DE CAMPO

6.1. Evaluación visual de la estabilidad de taludes

La investigación estuvo dirigida hacia el diseño de un sistema de clasificación de la estabilidad de taludes; la estabilidad de los taludes fue clasificada visualmente en el campo como estable o inestable, con una subdivisión además de los inestables con pequeños problemas y de los inestables con grandes problemas. En principio el término "grande" implica que la masa de roca inestable está en el valor de toneladas de peso, mientras que el término "pequeño" implica que la masa rocosa inestable podría pesar del orden de kilogramos.

La estimación visual del grado de estabilidad de un talud es en cierto modo subjetiva. Esto es un problema en todos los sistemas de clasificación. Para el sistema SSPC, las estimaciones han sido realizadas a lo largo de un periodo de 4 años, participando al menos 60 observadores del *Staff* y estudiantes del ITC y de la Universidad de Tecnología de Delft, trabajando sobre 184 taludes. Es por esto razonable suponer que no existen prejuicios en los observadores.

6.2. Unidades geotécnicas en un macizo rocoso

Técnicamente, una evaluación adecuada para determinar el comportamiento de un macizo rocoso debe incluir todas las propiedades de la masa rocosa y todas las variaciones especiales de las propiedades. Esto será poco realista y no es posible sin la destrucción del macizo rocoso, por esto el procedimiento estándar consiste en dividir un macizo heterogéneo en unidades geotécnicas homogéneas. En la práctica, tal homogeneidad es rara vez encontrada y el material y las propiedades de las discontinuidades varían en un intervalo de valores elegido en las unidades.

6.3. Mecanismos de rotura

Mecanismos de rotura tales como desplazamiento con corte y los diferentes modos de rotura resultantes (rotura plana, rotura en cuña, vuelco parcial y pandeo) están relacionados con las discontinuidades y son dependientes de las orientaciones de los taludes y de las discontinuidades.

Los mecanismos de rotura que no están relacionados con las orientaciones del talud y las discontinuidades

pueden provocar también la rotura de un talud. Ejemplos de éstos son la rotura de la roca intacta bajo la influencia de las tensiones en el talud y el arrastre del material superficial del talud debido al agua de escorrentía y el agua de filtración de la masa rocosa (desmoronamiento).

Los análisis tradicionales de estabilidad de taludes se basan en el reconocimiento del tipo de rotura en el campo seguido por unos cálculos retrospectivos. Aunque los tipos de rotura causantes de la inestabilidad de los taludes son teóricamente bien conocidos, es frecuentemente difícil reconocer el tipo de rotura operante en el campo. En muchos taludes inestables intervienen tipos múltiples de forma simultánea o sucesivamente. No todos ellos son fácilmente reconocibles o visibles. Sin embargo, no sólo tienen que ser identificados apropiadamente los tipos de rotura, sino que los taludes en los que trabajan diferentes tipos, también, la contribución de cada uno de ellos a la inestabilidad global debería ser cuantificada. En el caso de tipos de rotura sucesivos, el momento en el que el talud es examinado puede determinar el tipo de rotura identificada. Por estos motivos los taludes estables o inestables han sido analizados en esta investigación sin considerar a las causas de inestabilidad para suprimir el problema de identificar exactamente los tipos de rotura en el campo.

7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO

Las propiedades del macizo rocoso necesarias para el sistema SSPC (resistencia de la roca intacta, y estado y espaciamiento de las discontinuidades) son determinadas con medios relativamente simples en el campo.

7.1. Resistencia de la roca intacta

La resistencia de la roca intacta se establece en el campo por un "procedimiento simple" siguiendo la tabla recogida en la Fig. 15. El método ha sido ensayado extensamente y los resultados comparados con las resistencias obtenidas en laboratorio de los ensayos de resistencia a compresión simple. Las resistencias determinadas por ese "procedimiento simple" por aproximadamente 50 personas diferentes muestran que los resultados de los ensayos en campo son comparables con la calidad de los resultados de laboratorio de los ensayos de RCS (Hack, 1998).

Aunque los ensayos con el "procedimiento simple" pueden ser considerados subjetivos, solamente con un corto periodo de entrenamiento con muestras de roca con resistencias a compresión simple conocidas es suficiente para reducir la subjetividad a un nivel aceptable. En un tiempo muy reducido pueden ser hechos muchos ensayos con el "procedimiento simple" y no depende así de obtener muestras suficientemente grandes para ensayar en laboratorio. El mayor número de ensayos da también una mejor indicación de la variación de la resistencia de la roca intacta a través del macizo rocoso que la que puede ser obtenida de un número limitado de valores de ensayos de RCS (Hack, 1998).

7.2. Orientación, espaciamiento y estado de las discontinuidades

La orientación de las discontinuidades en combinación con la resistencia al corte a lo largo de éstas determina la posibilidad de movimiento a través de las mismas y por esto tienen una gran influencia sobre el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Lo primero será establecer si las discontinuidades pertenecen a una "familia" o serán tratadas como una característica "simple". La determinación de los parámetros de una

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

familia de discontinuidades requiere unos procedimientos de ponderación de los parámetros de las discontinuidades individuales.

La orientación media de un conjunto de discontinuidades o familia puede ser deducido matemáticamente o por métodos de estereo proyección (Terzaghi, 1965; Taylor, 1980; Hoek y Bray, 1981; Davis, 1986).

Las propiedades características de cada familia de discontinuidades son la media de las propiedades de cada discontinuidad medida perteneciente a esa familia. Un inconveniente de estos métodos es que puede ser difícil distinguir entre las diferentes familias de discontinuidades. Además, una familia de discontinuidades puede ser perdida o infravalorada en importancia debido a que el espaciado entre discontinuidades es grande. Éste y otros errores que pueden afectar a los resultados de los métodos de proyección estereográfica para determinar las familias de discontinuidades y las orientaciones son tratados extensamente por Terzaghi (1965).

Alternativamente, una evaluación estudiada puede ser acometida, en la que las discontinuidades que son representativas para una familia sean visualmente seleccionadas. Las propiedades de las discontinuidades seleccionada son entonces medidas en detalle en localizaciones predeterminadas.

En opinión de los autores, basándose en la experiencia de trabajos anteriores y de esta investigación, este método da un resultado igual o mejor que los resultados de un gran número de medidas de discontinuidades para un análisis estadístico. Normalmente se hacen un gran número de medidas sobre una parte de un frente expuesto que es (fácilmente) accesible, si es representativo del macizo rocoso o no. Las mismas observaciones han sido hechas por otros investigadores (Gabrielsen, 1990). Sin embargo, la variación de las propiedades de las discontinuidades en una de las familias es frecuentemente bastante mayor, por lo que un alto grado de precisión en una medida individual no es muy importante (ISRM, 1978, 1981) y la variación de las propiedades ésta cubierta por la aproximación probabilística del sistema SSPC.

7.3. Determinación de las propiedades representativas de la resistencia al corte de una discontinuidad

La resistencia al corte de una discontinuidad está determinada por el criterio de deslizamiento que convierte una caracterización visual y táctil (establecimiento o verificación de la rugosidad por tacto) de una discontinuidad en un ángulo de fricción aparente a lo largo de un plano de discontinuidad (Hack y Price, 1995).

La Fig. 15 recoge los diferentes términos descriptivos. El método de caracterización de las discontinuidades en el sistema SSPC se basa parcialmente en la bibliografía existente (Rengers, 1971; ISRM, 1978; Laubscher, 1990). La rugosidad a gran escala es determinada siguiendo los ejemplos de la Fig. 3. Los factores de rugosidad a pequeña escala son una combinación de la rugosidad visible de un área de aproximadamente 20 x 20 cm² y la rugosidad táctil. La rugosidad visible a pequeña escala (e.g. "escarpada", "ondulada" y "planar") son establecidas siguiendo los ejemplos de la Fig. 4.

La rugosidad táctil (material) se establece mediante el tacto (e.g. rugosa, suave y pulida). La relación entre los diferentes parámetros de rugosidad se ilustra en la Fig. 5. El material de relleno de las discontinuidades y la presencia de Karst a lo largo de éstas se caracterizan siguiendo la tabla de la Fig. 15. Esta figura también muestra las características de las discontinuidades que son traducidas en valores para cuatro factores: rugosidad a gran escala (RI) y a pequeña escala (Rs), material de relleno (Im) y Karst (Ka). El factor de estado para una discontinuidad (TC) se calcula mediante la simple multiplicación de estos cuatro factores:

$$TC = Rl \cdot Rs \cdot Im \cdot Ka \quad (1)$$

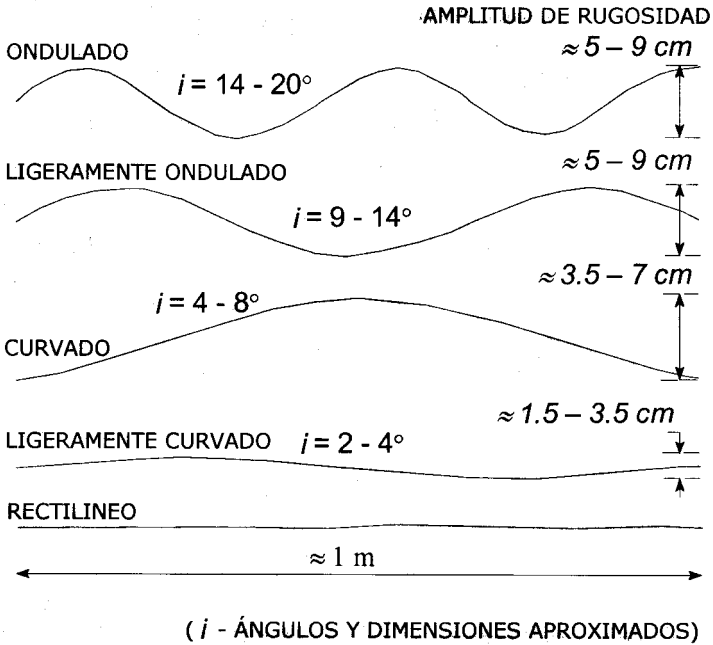


Figura 3. Perfiles de rugosidad a gran escala.

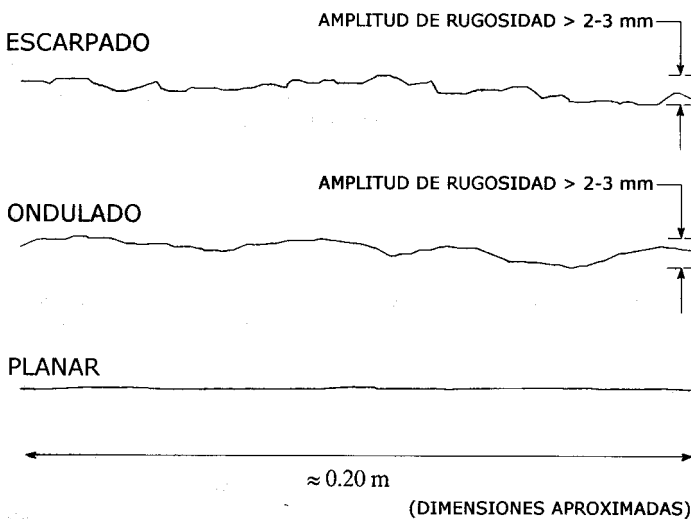


Figura 4. Perfiles de rugosidad a pequeña escala.

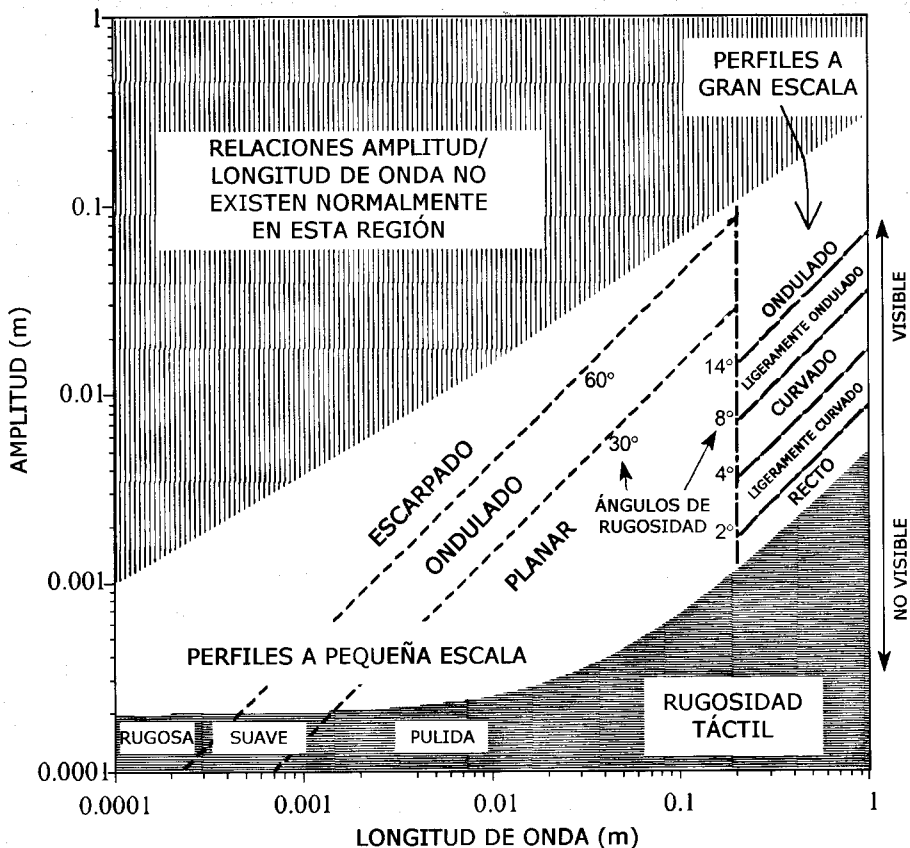


Figura 5. Interpretación de la rugosidad como una función de la longitud de onda y la amplitud. Para longitudes de onda y amplitudes pequeñas, la rugosidad cambia a una forma más sinoidal. El brillo no es incluido en la frontera entre la rugosidad visible y no visible. Los límites en el gráfico son a trazos ya que éstos no son exactos.

7.4. Discontinuidades no adecuada

La contribución de la rugosidad a la resistencia al corte se reduce si las discontinuidades no son adecuadas (Rengers, 1971). Para la rugosidad a gran escala, solamente puede ser hecha una estimación de tal manera que la contribución de la rugosidad a gran escala a la resistencia al corte es reducida debido a la no adecuación. Para la rugosidad a pequeña escala visible, puede seguirse un procedimiento similar, pero pueden usarse también los ensayos en cajas de corte o inclinadas y los resultados convertirse en una caracterización de la rugosidad (Hack y Price, 1995). Si una discontinuidad es completamente no apropiada, la resistencia al corte depende solamente de la rugosidad del material, e.g. rugosa, suave o pulida. Tales discontinuidades serán caracterizadas como "planares" para la rugosidad visible a pequeña escala y "rectilíneas" para la rugosidad a gran escala.

7.5. Discontinuidades no persistentes

Una discontinuidad no persistente (e.g. una discontinuidad que termina en roca intacta) es tratada como una discontinuidad con una rugosidad a pequeña escala de "rugosidad escalonada". La rotura a través de las asperezas tiene que tener lugar antes de que ocurra el desplazamiento a través de la discontinuidad con rugosidad escalonada. Esta aproximación es similar a la usada en el sistema Q (Barton, 1976).

8. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La estabilidad es determinada mediante dos análisis: el primero está relacionado con la orientación de las discontinuidades y del talud ("Estabilidad dependiente de la orientación") y el segundo con la resistencia del macizo rocoso en la que se encuentra el talud, independientemente de la orientación de las discontinuidades y del talud ("estabilidad independiente de la orientación").

8.1. Estabilidad dependiente de la orientación

Las roturas en taludes rocosos frecuentemente dependen de la orientación del talud y de las discontinuidades en el macizo rocoso. El parámetro principal que gobierna este tipo de roturas es la resistencia al corte de las discontinuidades. En el sistema SSPC han sido desarrollados dos criterios para predecir la estabilidad dependiente de la orientación de un talud: el criterio de deslizamiento y el criterio vuelco.

8.2. Criterio deslizamiento

Se ha encontrado una relación entre el valor del estado de una discontinuidad TC (Ec.1) y el ángulo aparente del buzamiento del plano de discontinuidad en la dirección del buzamiento del talud (AP):

$$AP = \arctang(\cos\delta \cdot \tan dip_{discontinuidad}) \quad (2)$$

Si $AP > 0^\circ \rightarrow AP =$ Buzamiento aparente de la discontinuidad en la dirección de buzamiento del talud.

Si $AP < 0^\circ \rightarrow |AP| =$ Buzamiento aparente de la discontinuidad en la dirección opuesta al buzamiento del talud.

$$S = dip_{dirección_{talud}} - dip_{dirección_{discontinuidad}}$$

Debajo de la línea a trazos de la Fig. 6 solamente existen combinaciones de valores de TC y AP para discontinuidades visibles en días luminosos en taludes estables (los dos puntos situados por debajo de la línea son probablemente debido a errores de medida). El "criterio de deslizamiento" (Ec.3) es por esto considerado como una condición límite para deslizamientos en taludes y esto ocurre si:

$$TC < 0,0113 \cdot AP \quad (3)$$

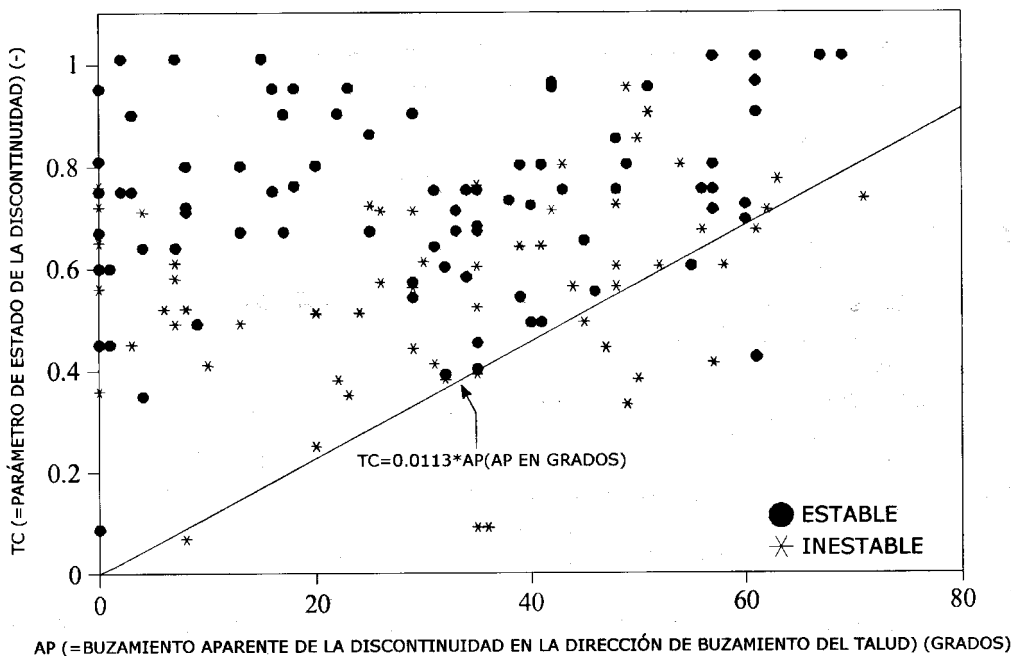


Figura 6. Estado de discontinuidad TC vs. AP para discontinuidades visibles en días luminosos en taludes estables e inestables.

El criterio de deslizamiento es confirmado por los valores de ensayos en campo y en laboratorio de fricción de discontinuidades y por valores de fricción de discontinuidades recogidos en la literatura (Hack y Price, 1995).

8.3. Criterio de vuelco

Análogamente al criterio de deslizamiento, el "criterio de vuelco" considera el deslizamiento entre bloques necesario para el vuelco tal como es definido por Goodman. El criterio de vuelco SSPC es:

$$TC < 0,0087 \cdot (-90^\circ - AP + dip_{discontinuidad}) \quad (4)$$

8.4. Condiciones adicionales

Las condiciones adicionales conciernen a la mínima diferencia entre el talud y los planos de discontinuidad para el criterio de deslizamiento: $dip_{talud} > AP + 5^\circ$. Esto es necesario debido a que la discontinuidad visible en un día luminoso con un buzamiento aparente (en la dirección del buzamiento del talud) simulan a aquel buzamiento del talud que forma el frente y que no causa la rotura por deslizamiento. Una segunda condición es que el plano de la discontinuidad no esté cerca de la vertical, ya que un plano vertical no puede ser plano

de deslizamiento o una causa de vuelco. Por esto, para que ocurra deslizamiento AP debe ser $< 85^\circ$. El valor 5° está basado en observaciones de campo que indican que la precisión de la medida está entorno a 5° . Las Figs. 9 y 10 dan la probabilidad para deslizamiento y vuelco respectivamente como una función del buzamiento aparente de la discontinuidad en relación al estado de la discontinuidad. Los cálculos de probabilidad se dan más adelante.

8.5. Metodología para optimizar el criterio de deslizamiento y el criterio de vuelco

Los criterios de deslizamiento y de vuelco pueden ser demostrados en un gráfico, pero como esto introduce alguna subjetividad, el criterio ha sido también establecido matemáticamente. Para determinar la línea límite para el criterio de deslizamiento, 300 conjuntos de puntos (AP, TC) fueron generados aleatoriamente de los datos de discontinuidades en taludes estables en el área de investigación, con la distribución del error estándar en AP y TC para punto de datos original (vease análisis de probabilidad más adelante). Fueron determinados de cada conjunto de puntos, un número de puntos (X) con los nuevos ratios de TC/AP. Éstos con los menores valores de TC/AP fueron utilizados debido a que la línea límite sería el menor límite del conjunto de datos. El talud y la intersección de una regresión lineal de estos puntos X fueron calculados para cada 300 conjuntos de puntos, resultando 300 líneas de regresión para las que se calculó un error medio y estándar. El número de puntos (X) usados para la regresión variaba de 2 a 30. La Fig. 7 muestra el procedimiento para $X = 2$ y la Fig. 8 el error medio y estándar de la intersección y del talud versus X. Si se usan seis puntos en la regresión, los valores para la intersección media y el talud medio son robustos (cambian sólo ligeramente si se usan más puntos) y los errores estándar se mantienen aproximadamente constantes. Como podría esperarse, el valor para el talud medio coincide con el límite determinado visualmente. El mismo procedimiento fue seguido para el criterio de vuelco.

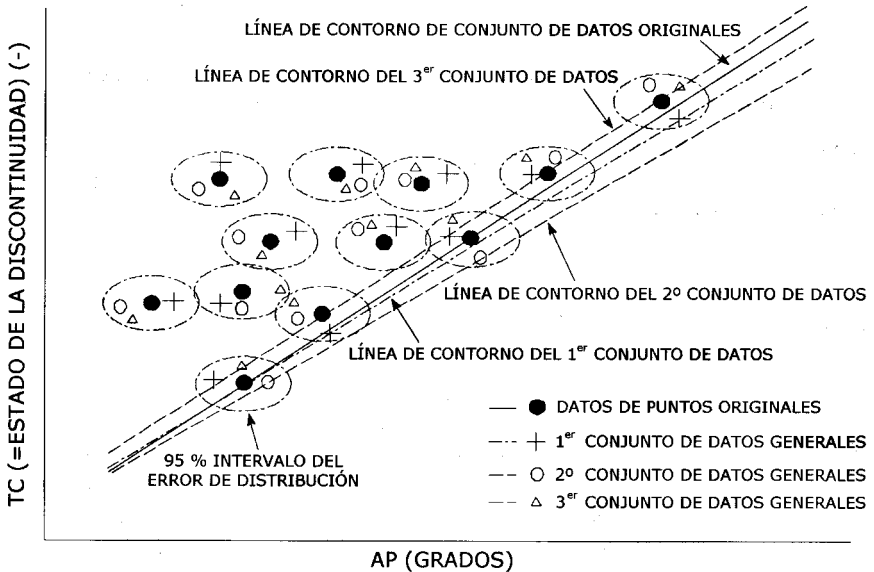


Figura 7. Esquema mostrando el procedimiento para calcular la línea límite para el "criterio de deslizamiento" para $X = 2$ (e.g. línea límite basada en dos puntos).

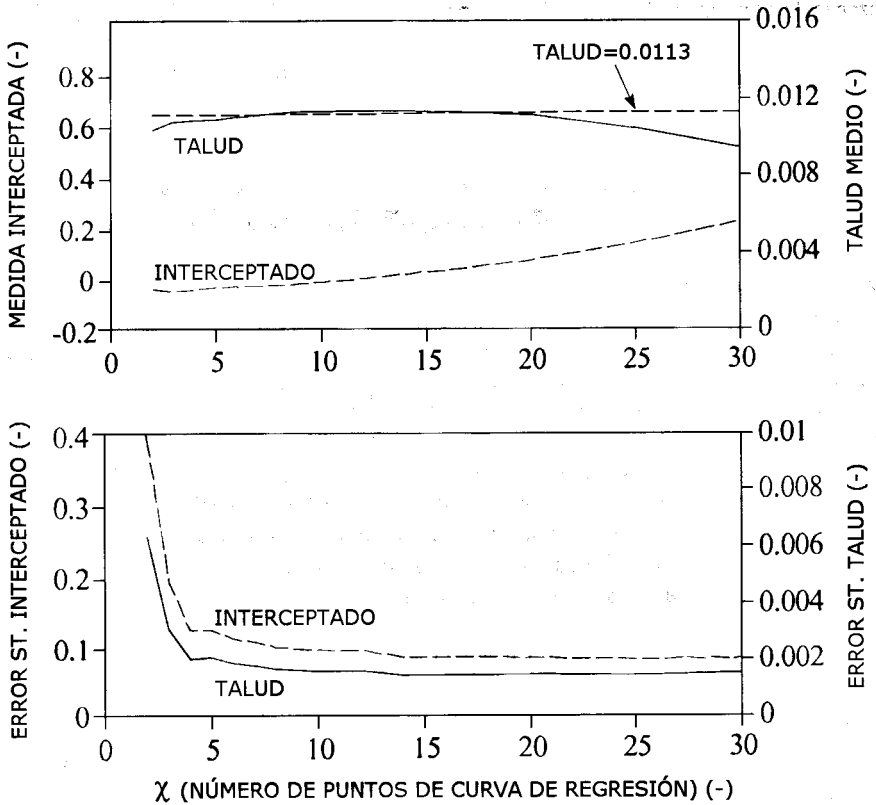


Figura 8. Error medio y estándar de las líneas límite del talud y de las intersecciones vs X, para el "criterio de deslizamiento".

8.6. Estabilidad independiente de la orientación

Fueron encontrados un gran número de taludes no siendo inestables utilizando el criterio de deslizamiento y de vuelco, aunque fueron evaluados en el campo como inestables. Para estos taludes, podría ser formulado un modelo matemático para predecir la estabilidad independiente de la orientación. Muchas de las roturas en estos taludes fueron aproximadamente lineales, aunque no sigan uno único o el mismo plano de discontinuidad existente. Frecuentemente, la fracturación de la roca intacta a muy pequeñas distancias (con relación al tamaño del talud) resulta en planos de rotura lineal desarrollándose parcialmente a través de roca intacta y parcialmente siguiendo planos de discontinuidad existentes. Este efecto era más prominente en macizos rocosos en los que el tamaño de bloques era menor. La resistencia de la roca intacta, el tamaño de bloque y la resistencia al corte a lo largo de discontinuidades tienen por esto influencia en el desarrollo de planos de rotura no relacionados con una simple discontinuidad existente.

La estabilidad independiente de la orientación de tales taludes fue modelado siguiendo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, mediante un modelo plano de corte lineal (Hack, 1998). Los parámetros de cohesión y

fricción en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb son la cohesión y la fricción aparentes del macizo rocoso. La cohesión y la fricción del macizo rocoso son dependientes de la resistencia de la roca intacta, el tamaño de bloque (e.g. espaciamiento de discontinuidades) y resistencia al corte (e.g. estado de las discontinuidades) a lo largo de todas las discontinuidades del macizo rocoso.

8.7. Tamaño de bloque y estado de las discontinuidades

Existen diversas opciones para incorporar al modelo plano de corte la resistencia de la roca intacta, el tamaño de bloque y el estado de todas las discontinuidades. Análisis extensos (Hack, 19998) dan los mejores resultados para el tamaño de bloque (SPA) si se basan en los factores de Taylor (1980); véase el gráfico en la Fig. 16:

- Para tres familias de discontinuidades:

$$SPA = \text{factor}_{\text{máximo}} \cdot \text{factor}_{\text{intermedio}} \cdot \text{factor}_{\text{mínimo}}$$

- Para dos familias de discontinuidades:

$$SPA = \text{factor}_{\text{máximo}} \cdot \text{factor}_{\text{mínimo}} \tag{5}$$

- Para una familia de discontinuidades:

$$SPA = \text{factor}$$

siendo:

SPA = Parámetro espaciamiento

Factor_x = Determinado a partir del gráfico de la Fig. 16.

La mejor formulación para el estado de las discontinuidades en un macizo rocoso (CD) fue encontrada al basarse en la media ponderada de los estados de tres familias de discontinuidades teniendo en cuenta los espaciamientos de éstas:

$$CD = \frac{\frac{TC_1}{DS_1} + \frac{TC_2}{DS_2} + \frac{TC_3}{DS_3}}{\frac{1}{DS_1} + \frac{1}{DS_2} + \frac{1}{DS_3}} \tag{6}$$

TC_{1,2,3} son los estados, y DS_{1,2,3} son los espaciamientos de las familias de discontinuidades 1, 2 y 3.

8.8. Cohesión y fricción del macizo rocoso SSPC

Optimizando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb con la resistencia de la roca intacta (IRS), el espaciamiento (SPA) y el estado de las discontinuidades (CD) se obtiene la cohesión y la fricción de un macizo rocoso:

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

$$\varphi_{\text{máximo}} = IRS \cdot 0,2417 + SPA \cdot 52,12 + CD \cdot 5,779$$

$$coh_{\text{máximo}} = IRS \cdot 94,27 + SPA \cdot 28629 + CD \cdot 3593$$

Si la resistencia de la roca intacta > 132 MPa – IRS = 132 (7)

siendo:

φ'_{macizo} = Ángulo de fricción interna del macizo rocoso (grados).

Coh'_{macizo} = Cohesión del macizo rocoso (Pa).

La resistencia de la roca intacta en la ecuación 7 es maximizada. Por encima de un valor de aproximadamente 132 MPa, se encontró que la estabilidad de los taludes no se incrementa con el aumento de la resistencia de la roca intacta. Esto era válido para taludes en el área de investigación en el intervalo de alturas de hasta 45 m. Para taludes altos con grandes tensiones puede ser necesario un valor grande para el máximo de resistencia de la roca intacta. Tanto para el espaciamiento (SPA) y estado (CD) la combinación de familias de discontinuidades que da lugar a la fricción mínima del macizo rocoso fue siempre tenida en cuenta.

Aún más, si el macizo rocoso contiene tres o más familias de discontinuidades puede ser que los factores de espaciamiento (SPA) y de estado (CD) calculados a partir de una o dos familias de discontinuidades den un resultado menor.

8.9. Modelo de plano de cizalladura lineal y altura máxima de talud

El modelo de un plano de cizalladura lineal siguiendo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb implica que la estabilidad de un talud es independiente de la altura del talud si el talud tiene un buzamiento menor que la fricción del macizo rocoso. Sin embargo, la altura del talud, está limitada por un máximo si el buzamiento del talud es mayor que la fricción. La altura máxima del talud está determinado por las tensiones en el talud. Para un macizo rocoso con un peso unitario de 25 kN/m³ ésta es:

$$\text{si } dip_{\text{talud}} \leq \varphi_{\text{macizo}}$$

la altura máxima del talud ($H_{\text{máx}}$) es infinita. Por otro lado

$$H_{\text{máx}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot coh_{\text{macizo}} \cdot \frac{\text{sen}(dip_{\text{talud}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{macizo}})}{1 - \cos(dip_{\text{talud}} - \varphi_{\text{macizo}})} \quad (8)$$

8.10. Estabilidad

En términos de probabilidad, la estabilidad independiente de la orientación está dada en la Fig. 11. Los ejes están horizontalmente normalizados con la relación de fricción del macizo rocoso y buzamiento del talud y verticalmente con la altura máxima posible ($H_{\text{máx}}$) con relación a la altura de ladera (H_{talud}).

8.11. Metodología para optimizar el criterio de rotura independiente de la orientación

φ_{macizo} y $\text{coh}_{\text{macizo}}$ se suponen que dependen de los parámetros del macizo rocoso medidos en el campo, e.g. resistencia de la roca intacta (IRS), espaciamiento de las discontinuidades (SPA) y estado de las discontinuidades (CD). Aparte de las discontinuidades lineales entre φ_{macizo} y $\text{coh}_{\text{macizo}}$ e IRS, SPA y CD, también se han investigado relaciones de las siguientes formas:

$$\varphi_{\text{macizo}} \text{ o } \text{coh}_{\text{macizo}} = \text{IRS} \cdot e^{\frac{-w1}{\text{SPA} \cdot \text{CD}}}$$

$$\varphi_{\text{macizo}} \text{ o } \text{coh}_{\text{macizo}} = \text{IRS} \cdot \text{SPA}^{w1} \cdot \text{CD}^{w2} \quad (9)$$

En esta investigación se ha encontrado que φ_{macizo} y $\text{coh}_{\text{macizo}}$ pueden ser razonablemente representados por una combinación lineal de IRS, SPA y CD. La influencia de la resistencia de la roca intacta sobre la estabilidad de un talud está limitada por un máximo, i.e. un valor de corte. La relaciones lineales para φ_{macizo} y $\text{coh}_{\text{macizo}}$ con un valor de corte para la resistencia de la roca intacta (IRS) resulta en lo siguiente:

$$\text{coh}_{\text{macizo}} = w0 \cdot \text{IRS} + w1 \cdot \text{SPA} + w2 \cdot \text{CD}$$

$$\varphi_{\text{macizo}} = w3 \cdot \text{IRS} + w4 \cdot \text{SPA} + w5 \cdot \text{CD}$$

Si $\text{IRS} \leq \text{valor de corte} \rightarrow \text{IRS} = \text{Resistencia de la roca intacta (medida en el campo)}$ (10)

Si $\text{IRS} > \text{valor de corte} \rightarrow \text{IRS} = \text{Valor de corte}$

factores de ponderación: $w0, w1, \dots, w5 \geq 0$.

φ_{macizo} , la fricción del macizo rocoso, tiene un valor en el intervalo de 0 a 90° (o a $\pi/2$). φ_{macizo} tiene que ser normalizada de manera que el valor nunca está fuera de este intervalo, estando disponible para optimizar el modelo de cizalladura plano. El valor máximo de φ_{macizo} es obtenido para una resistencia de la roca intacta (IRS) igual al valor de corte, SPA igual a su valor máximo de 1,00 y CD a su valor máximo de 1,0165. Por lo tanto, el máximo para φ_{macizo} es expresado por:

$$\varphi_{\text{macizo}}^{\text{máximo}} = w3 \cdot \text{valor de corte} + w4 \cdot 1,00 + w5 \cdot 1,0165 \quad (11)$$

φ_{macizo} en la ecuación 10 debe por esto ser dividido por $\varphi_{\text{macizo}}^{\text{máximo}}$ (máximo) y multiplicado por $\pi/2$. Las grandes diferencias en el orden de magnitud de los valores de los parámetros pueden tener una influencia sobre los valores óptimos encontrados en la optimización no lineal. Por esto, la resistencia de la roca intacta (IRS) en la ecuación 10 ha sido dividida por 100 para reducir la diferencia con SPA y CD. La normalización de φ_{macizo} y la división de IRS por 100 combinadas con las ecuaciones 8 y 10 permiten a un conjunto de ecuaciones descubrir el modelo plano de cizalladura:

$$\text{dip}_{\text{talud}} \geq \varphi_{\text{macizo}} \rightarrow$$

$$H_{\text{max}} = 4 \cdot \frac{\text{coh}_{\text{macizo}}}{UW} \cdot \frac{\text{sen}(\text{dip}_{\text{talud}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{macizo}})}{1 - \cos(\text{dip}_{\text{talud}} - \varphi_{\text{macizo}})}$$

$$dip_{talud} < \varphi_{macizo} \rightarrow H_{m\acute{a}x} = \text{ilimitada}$$

$$coh_{macizo} = a_0 \cdot \frac{IRS}{100} + a_1 \cdot SPA + a_2 \cdot CD$$

$$\varphi_{macizo} = \left(\frac{a_3 \cdot \frac{IRS}{100} + a_4 \cdot SPA + a_5 \cdot CD}{a_3 \cdot a_6 + a_4 + a_5 \cdot 1,0165} \right) \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Si } \frac{IRS}{100} \leq a_6 \rightarrow IRS = \text{Resistencia de la roca intacta (MPa)} \quad (12)$$

siendo:

- a0 hasta a6 = Factores de ponderación
- dip_{talud} = Buzamiento del talud
- H_{max} = Altura máxima posible del talud
- UW = Peso unitario del macizo rocoso.

SPA es calculado siguiendo la ecuación 5 y CD siguiendo la ecuación 6. El valor del peso unitario del macizo rocoso se considera que es el mismo para todos los macizos rocosos en el área de investigación. Los pesos unitarios de roca intacta medidos están en el intervalo 25,5 y 27,0 kN/m³. Una pequeña proporción de discontinuidades cubiertas en el macizo rocoso indican que el peso unitario del macizo es aproximadamente el mismo que el del material. También fue considerado que con unidades de roca kársticas no tienen un peso unitario considerablemente menor que el peso unitario de la roca intacta.

En la ecuación 12, los valores de los factores a0 hasta a6 son desconocidos. La ecuación 12 es por ello optimizada (siguiendo el conjunto de reglas de optimización en la Ec. 13) sobre los taludes que son inestables debidos a la estabilidad dependiente de la orientación.

Para cada talud j:

$$\begin{aligned} &\text{ESTABILIDAD ESTIMADA VISUALMENTE = ESTABLE} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi_{macizo}}{dip_{talud}} \geq 1 \text{ (estable)} \rightarrow er = 1 \\ \frac{\varphi_{macizo}}{dip_{talud}} < 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_{max}}{H_{talud}} \geq 1 \text{ (estable)} \rightarrow er = 1 \\ \frac{H_{max}}{H_{talud}} < 1 \text{ (estable)} \rightarrow er = \frac{H_{talud}}{H_{max}} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ \\ &\text{ESTABILIDAD ESTIMADA VISUALMENTE = CLASE 2 o 3} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi_{macizo}}{dip_{talud}} \geq 1 \text{ (estable)} \rightarrow er = \frac{\varphi_{macizo}}{dip_{talud}} \\ \frac{\varphi_{macizo}}{dip_{talud}} < 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_{max}}{H_{talud}} \leq 1 \text{ (Inestable)} \rightarrow er = 1 \\ \frac{H_{max}}{H_{talud}} > 1 \text{ (estable)} \rightarrow er = \frac{H_{max}}{H_{talud}} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (13)$$

$$ER = \sum_j er_j$$

En la ecuación 13, H_{talud} y dip_{talud} son la altura y el buzamiento del talud existente y Φ_{macizo} y $H_{\text{máx}}$ son definidas en la ecuación 12. ER en la ecuación 13 es el valor sobre el que es optimizado. ER es igual al sumatorio de er_j de todos los taludes utilizados en la optimización.

El procedimiento de optimización consiste en que para cada talud (j) la Φ_{macizo} y la $H_{\text{máx}}$ son calculadas siguiendo la Ec (12) con los valores elegidos (inicialmente aleatorios) para los desconocidos a_0 a a_6 . Si para el talud (j) la Φ_{macizo} es mayor que el buzamiento del talud existente (dip_{talud}), entonces el talud (j) será estable siguiendo el modelo de plano de cizalladura. Si esto está en concordancia con la estabilidad estimada visualmente del talud existente (j) los desconocidos factores a_0 hasta a_6 son correctamente elegidos. Por esto, er_j es el conjunto para el valor 1. Si el talud existente (j) no es estable entonces los factores desconocidos a_0 hasta a_6 no son corregidos y er_j es el conjunto para un valor mayor que 1, que refleja como mucho que el Φ_{macizo} calculado difiere de los valores que podrían resultar de la estabilidad en equilibrio (i.e., $er_j = \Phi_{\text{macizo}} / dip_{\text{talud}}$).

El procedimiento es más complejo si $\Phi_{\text{macizo}} < dip_{\text{talud}}$. La altura posible teóricamente ($= H_{\text{máx}}$) será entonces comparada con la altura real del talud existente (j) ($= H_{\text{talud}}$). Si es mayor que la altura del talud existente (j) entonces el talud (j) será estable siguiendo el modelo plano de cizalladura con el conjunto de valores elegido para los factores desconocidos a_0 a a_6 . Si esto está en concordancia con la estabilidad del talud estimada visualmente (j) entonces el cálculo es correcto y er_j es fijado al valor 1. Si el talud existente (j) es evaluado visualmente como inestable entonces los factores desconocidos a_0 a a_6 no son los correctos y er_j es fijado en un valor mayor que 1 que refleja cuanto difiere la $H_{\text{máx}}$ calculada de los valores que resultarían de la estabilidad en equilibrio siguiendo el modelo plano de cizalladura calculado para el talud (j) (i.e. $er = H_{\text{máx}} / H_{\text{talud}}$). Si el talud (j) es calculado para ser inestable ($H_{\text{máx}} < H_{\text{talud}}$) y el talud (j) es también visualmente evaluado como inestable, los factores desconocidos son correctamente estimados y $er_j = 1$. Si el talud es visualmente evaluado como estable, los factores desconocidos son, sin embargo, incorrectos y el valor de er_j debe ser ajustado a un valor que refleje el grado de error de cálculo ($er_j = H_{\text{talud}} / H_{\text{máx}}$).

Lo anterior es acometido para todos los taludes con un conjunto de valores para los factores desconocidos a_0 y a_6 . La er_j de todos los taludes son entonces sumados para obtener ER. Un segundo conjunto de factores desconocidos a_0 y a_6 es determinado siguiendo la rutina de optimización de Levenberg-Marquardt (1963) y el ER es calculado siguiendo el mismo procedimiento.

La rutina de optimización compara los valores ER para los diferentes conjuntos de factores desconocidos y se basa en éstos para determinar un nuevo conjunto de valores de los desconocidos a_0 y a_6 , de manera tal que el ER calculado que se basa sobre estos nuevos valores es probablemente menor que aquellos empleados anteriormente. La rutina de optimización continua hasta que no se consigue una reducción de ER. Los valores de a_0 y a_6 resultantes del menor valor de ER son considerados como los valores más apropiados para los que el modelo plano de cizalladura formulado en la ecuación (12) mejor se ajusta a los datos.

ER igualará al número de taludes utilizado en la optimización si el modelo plano de cizalladura es el modelo corregido completamente para la estabilidad independiente de la orientación, si el conjunto de datos es ideal (sin error en cualquiera de los parámetros de cualquier talud), y si los factores a_0 a a_6 están en los valores óptimos. La estabilidad calculada con el modelo plano de cizalladura entonces será la misma que la estabilidad del talud estimada visualmente en el campo para todos los taludes. Obviamente, esto es improbable debido a que el modelo plano de cizalladura no es un modelo corregido completamente y el conjunto de datos no se probablemente ideal. Por esto hay siempre un cierto porcentaje de taludes para los que la estabilidad del talud siguiendo el modelo plano de cizalladura no es igual a la estabilidad estimada

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

visualmente en el campo. Por esta razón, el valor de ER es siempre mayor que el número total de taludes utilizado en la optimización. El objetivo de la optimización es minimizar ER.

Los valores para a_0 a a_6 en la ecuación (12) perteneciente al valor mínimo de ER son entonces tomados siendo los valores que mejor ajustan el conjunto de datos.

Durante el proceso de optimización, los ratios de $H_{\text{talud}} / H_{\text{máx}}$ (para taludes estimados visualmente como estables) y $H_{\text{máx}} / H_{\text{talud}}$ (para taludes estimados visualmente como inestables) están limitados a un valor máximo de 2. El ratio $\Phi_{\text{macizo}} / \text{dip}_{\text{talud}}$ (para taludes estimados visualmente como inestables) es de manera similar limitado a 2. Estas limitaciones son necesarias para eliminar la fuerte influencia de posibles situaciones extremas. En particular, $H_{\text{máx}}$ llega a ser grande (extremadamente) e influye en la optimización muy significativamente para una situación con Φ_{macizo} menor que, pero también igual a, el buzamiento del talud.

La altura máxima posible de un talud rocoso ($H_{\text{máx}}$) es infinita si el ángulo de buzamiento del talud es menor que el ángulo de fricción del macizo (Φ_{macizo}).

Como una consecuencia de esto y del uso de un valor de corte para la resistencia de la roca intacta, la fricción de la ecuación (12) no es continua en su primera derivada. Debido a probablemente errores en los datos (estabilidad estimada visualmente, buzamiento, altura, resistencia de la roca intacta, etc.), la fricción también tiene múltiples mínimos. La optimización de una función que no es continua en la primera derivada y que contiene múltiples mínimos es difícil y es frecuentemente dudoso que pueda encontrarse un mínimo absoluto. La fricción es por esto examinada gráficamente para encontrar intervalos para los factores en los que la función probablemente se minimice (ER decreciente).

Entonces la rutina de optimización de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963) fue implementada con valores iniciales para los factores en los intervalos determinados gráficamente. Se encontró un mínimo menor para el que las optimizaciones en múltiples con diferentes valores iniciales resultaron en aproximadamente los mismos valores para los seis factores. Un examen gráfico de la función con estos valores mostraron que éstos eran probablemente los mejores posibles y representan el mínimo absoluto de la función. Estos valores son usados como valores iniciales en las optimizaciones para los análisis probabilísticos. La Fig. 12 muestra los resultados de la optimización con los datos del área de investigación. Obsérvese como podría esperarse que los taludes caracterizados visualmente como "inestables con pequeños problemas" caen cerca de la línea de equilibrio (línea a trazos). Sin embargo, esta información sobre la escala de la inestabilidad no es usada en la optimización y por esto confirma independientemente resultados de la optimización.

9. INFLUENCIA DEL AGUA

Las presiones de agua en las discontinuidades se considera tradicionalmente que tienen una gran importancia en la estabilidad de los taludes rocosos. Sin embargo, un examen más exhaustivo indica que, en general, esto debe ser tomado con cautela para muchos macizos rocosos. Bastantes macizos rocosos superficiales contienen muchas discontinuidades y por esto generalmente permiten al agua fluir libremente fuera del talud excavado, mientras la cubierta de suelo frecuentemente presente sobre un talud reduce el caudal de agua infiltrada al ser generalmente menos permeable que el macizo rocoso. Esto inhibe cualquier acumulación o fortalecimiento de las presiones del agua.

Otras razones para la menor o inexistentes presiones del agua es que cerca de los frentes de los taludes, es que las tensiones serán menores que las que se presentan en profundidad en los macizos rocosos.

Esas tensiones menores provocan que las discontinuidades sean abiertas y por esto se reducirán las presiones de agua en las mismas con el agua circulando en la dirección del frente del talud. La única situación en la que las presiones de agua tendrán una gran influencia es si un nuevo talud intersecta un nivel freático.

Sin embargo, esto podría preverse y con una buena ingeniería práctica proceder a adoptar medidas de drenaje apropiadas que depriman dicho nivel freático por detrás del frente del talud.

En los sistemas de clasificación de macizos rocosos propuestos con anterioridad, la influencia del agua varía ampliamente entre un 3 y un 15 %, siendo los valores inferiores más comunes en los sistemas de clasificación para estabilidad de taludes desarrollados recientemente (Hack, 1998). Por ejemplo, la influencia máxima de la presencia del agua en el sistema RMR es el 15 % (Bieniawski, 1989), en el sistema SMR el 13 % (Romana, 1985), el 6 % en el sistema desarrollado por Selby (1980) y solamente el 3 % en el sistema propuesto por Haines y Terbrugge (1991). El sistema SSPC no incorpora explícitamente un factor para la presencia de presiones de agua.

Sin embargo, la presencia de agua está incorporada en los factores para el material de relleno en las discontinuidades para los materiales que menos resisten si el agua está presente.

10. INFLUENCIAS LOCALES: METEORIZACIÓN Y MÉTODO DE EXCAVACIÓN

Las tres etapas de aproximación permiten la corrección de las influencias locales, tales como meteorización y daños debidos al método de excavación. El macizo rocoso "expuesto" es primeramente dividido en unidades geotécnicas. Para cada unidad geotécnica se determinan los parámetros del macizo rocoso y se convierten en parámetros del macizo rocoso "referencia" por corrección para la meteorización local en el frente caracterizado (Hack y Price, 1997) y para los daños debidos al método de excavación empleado para crear el citado frente. Estos factores de corrección son listados en la Fig. 15. La caracterización de la meteorización se hace siguiendo la norma BS5930 (1981) aunque para muchos macizos rocosos éstos pueden ser fácilmente convertidos cumpliendo con la norma revisada en 1999. Los parámetros que caracterizan el macizo rocoso "talud" son obtenidos por corrección de los del macizo rocoso "referencia" teniendo en cuenta los daños debidos al método de excavación a aplicar para crear el nuevo talud y teniendo en cuenta la actual y futura meteorización (véase Fig. 17).

La meteorización futura es predecible examinando las mismas unidades geotécnicas en frentes expuestos que ya existen y en los que se conoce el periodo de tiempo transcurrido. Téngase en cuenta que la meteorización puede depender de ciertos factores del frente, posición en el territorio (viento), uso de fertilizantes por agricultores que pueden influir en la estabilidad mineral (vía aguas subterráneas), etc. Aunque esto puede ser algunas veces difícil, la experiencia sugiere que puede conseguirse bastante información para estimar el grado de meteorización más probable de la unidad geotécnica al final de la vida ingenieril.

11. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

En el análisis, para cuantificar la fiabilidad de las funciones establecidas en el sistema SSPC para evaluar la estabilidad de taludes, fue aplicada una aproximación probabilística utilizando el Método de Monte Carlo (Hammersley y Hascombe, 1964). Los resultados de las simulaciones de Monte Carlo fueron utilizadas para fijar las líneas de probabilidad en las Figs. 9, 10 y 11. Esta metodología también permite una evaluación de

la sensibilidad de los resultados para errores de entrada. Los parámetros del macizo rocoso medidos tienen una distribución relacionada con una combinación de: (1) la variación de un parámetro en un macizo rocoso, (2) las limitaciones de la variación de un parámetro de un macizo rocoso impuesta por la subdivisión de las unidades geotécnicas y (3) el error cometido en la medida de los parámetros del macizo rocoso en una unidad geotécnica. Esto último puede determinarse repitiendo una medida muchas veces exactamente en la misma localización, de manera tal que pueda obtenerse el error estándar. Claramente, sólo puede usarse una simple localización o la distribución de un parámetro en la unidad geotécnica contribuirá al error estándar.

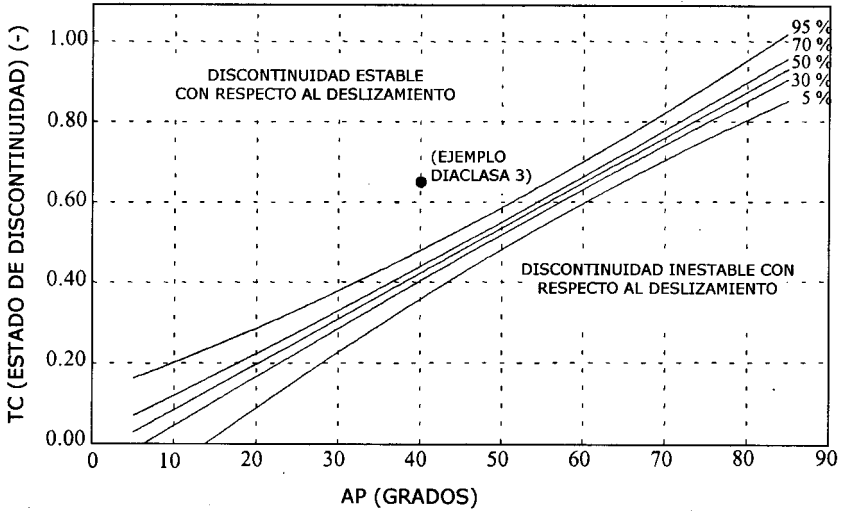


Figura 9. Criterio de deslizamiento.

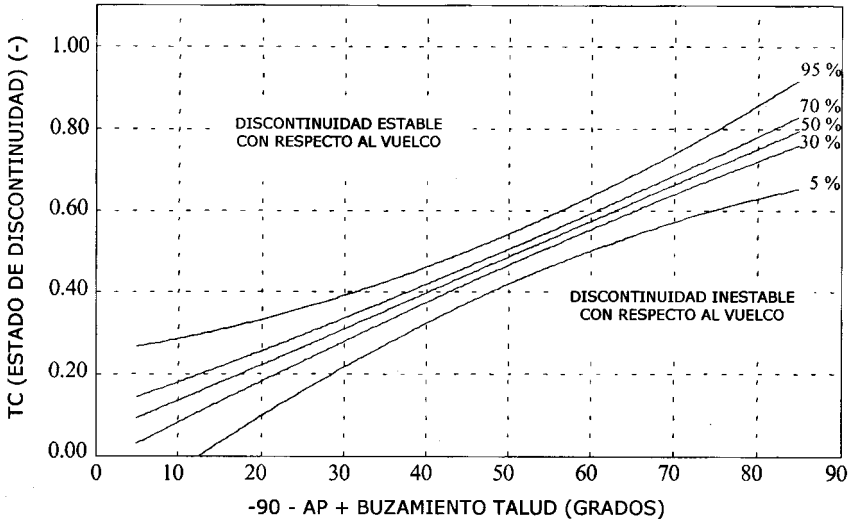


Figura 10. Criterio de vuelco.

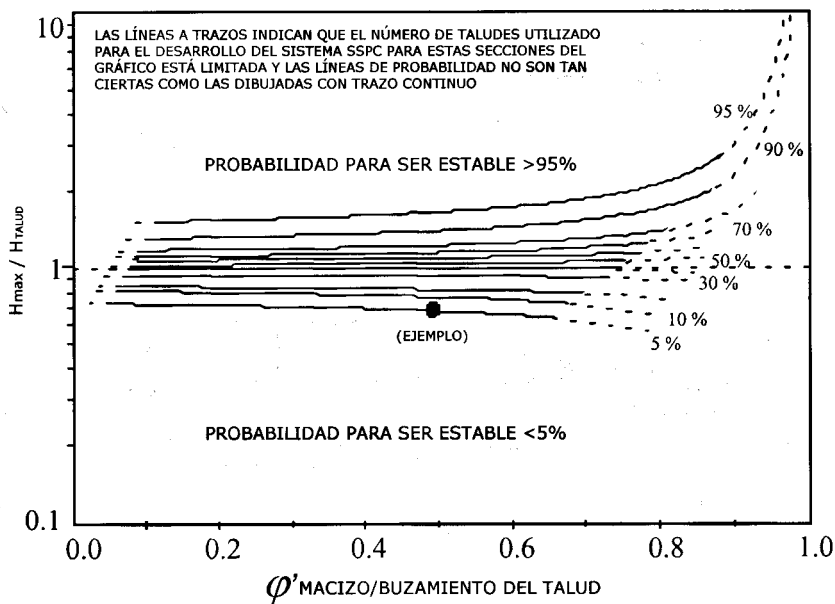


Figura 11. Probabilidad de orientación - estabilidad independiente.

Durante la investigación, fueron hechas por estudiantes y por miembros del equipo directivo repetidas medidas del mismo parámetro en la misma unidad geotécnica. La variación resultante de estas medidas se supuso que era el error típico de las distribuciones de las medidas de un valor característico de un parámetro particular de un macizo rocoso en una unidad geotécnica. Muchas de las distribuciones de los parámetros de los macizos rocosos fueron discretas o mostraban un comportamiento no normal cerca de los valores límite de los intervalos permitidos. Sin embargo, como las diferencias eran pequeñas en el análisis probabilístico las distribuciones no normales y las discretas fueron reemplazadas por distribuciones normales continuas. Las desviaciones estándar de estas distribuciones normales, directamente o expresado como porcentaje del valor medio (característico), fueron tomadas como el error estándar del valor característico de un parámetro del macizo rocoso. Los errores estándar no son los mismos para todas las unidades geotécnicas, ya que están con un amplio intervalo de valores permitidos probablemente también tengan una distribución amplia de valores característicos y por esto un gran error estándar. En el área de investigación, sin embargo, fueron aproximadamente idénticos en los diferentes tipos de macizos rocosos. Esto implica que diferentes observaciones dividen diferentes macizos rocosos en unidades geotécnicas para evaluar la estabilidad de taludes de forma tal que la variación permitida en una unidad es similar. Es por esto considerado realista suponer que el error de las distribuciones son representativos al medir el valor de un parámetro característico en una unidad geotécnica.

12. RESULTADOS Y EJEMPLO

12.1. Resultado

La Fig. 13 compara los resultados de las evaluaciones de estabilidad de 184 taludes siguiendo el sistema SSPC, el sistema de Haines (Haines y Terbrugge, 1991) y el SMR (Romana, 1983).

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

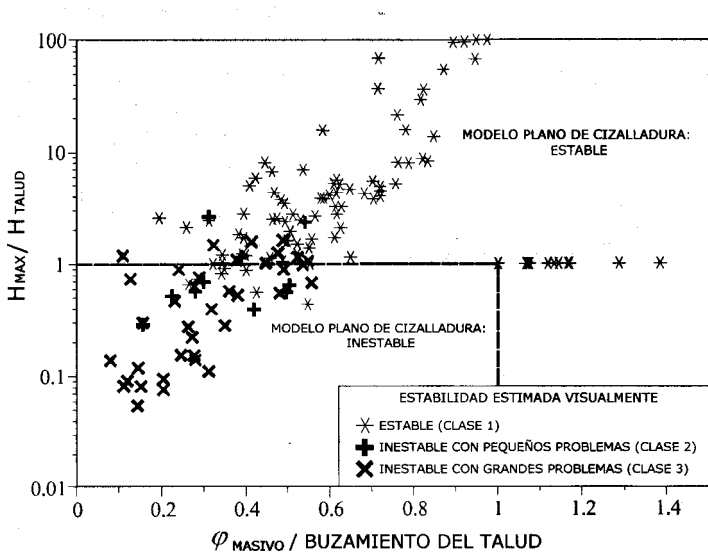


Figura 12. Resultados de la optimización para estabilidad independiente de la orientación.

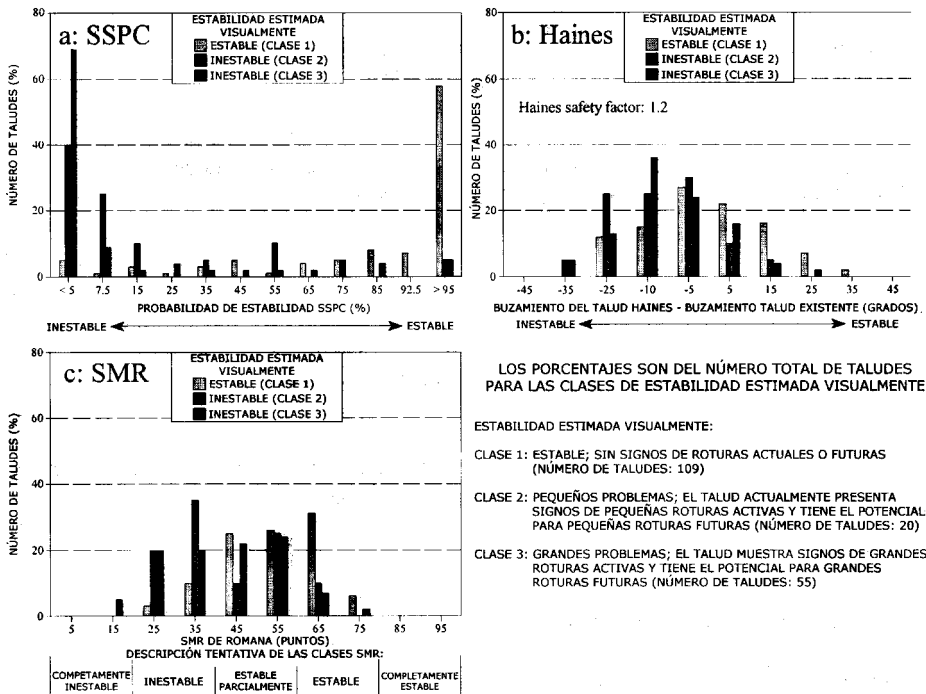


Figura 13. Comparación de las medidas de estabilidad de taludes por diferentes sistemas de clasificación.

El cálculo de la estabilidad de un talud con el sistema SSPC permite una diferenciación más clara entre condiciones estables e inestables que con los sistemas de Haines o con el SMR. Además, la correlación entre la estabilidad del talud estimada visualmente y las predicciones de estabilidad del sistema SSPC es mejor que la correlación con los otros sistemas de clasificación.

12.2. Ejemplo

El sistema SSPC, aplicado en unidades de estratificación delgada de caliza y dolomía en un talud recientemente volado (1988), originalmente con un frente de 75° a 80° (Fig. 14), se muestra en las Figs. 15, 16 y 17. El ángulo actual del frente (2000) está entre 60° y 70° . El talud está constituido por unidades interestratificadas delgadas (sobre la persona señalada en la Fig. 14) y medias hasta unidades de estratificación potentes. Las mismas unidades de estratificación delgadas son expuestas en taludes que a unos 50 m se sabe que tienen más de 40 años de antigüedad. Estos viejos taludes, con pendientes de 60° a 70° y alturas de aproximadamente 5 m, son aún estables (1995), observándose muy poca o nula degradación del macizo rocoso y con el material sólo ligeramente meteorizado. El método de excavación usado en estos antiguos taludes fue manual y con pequeños equipos mecánicos.

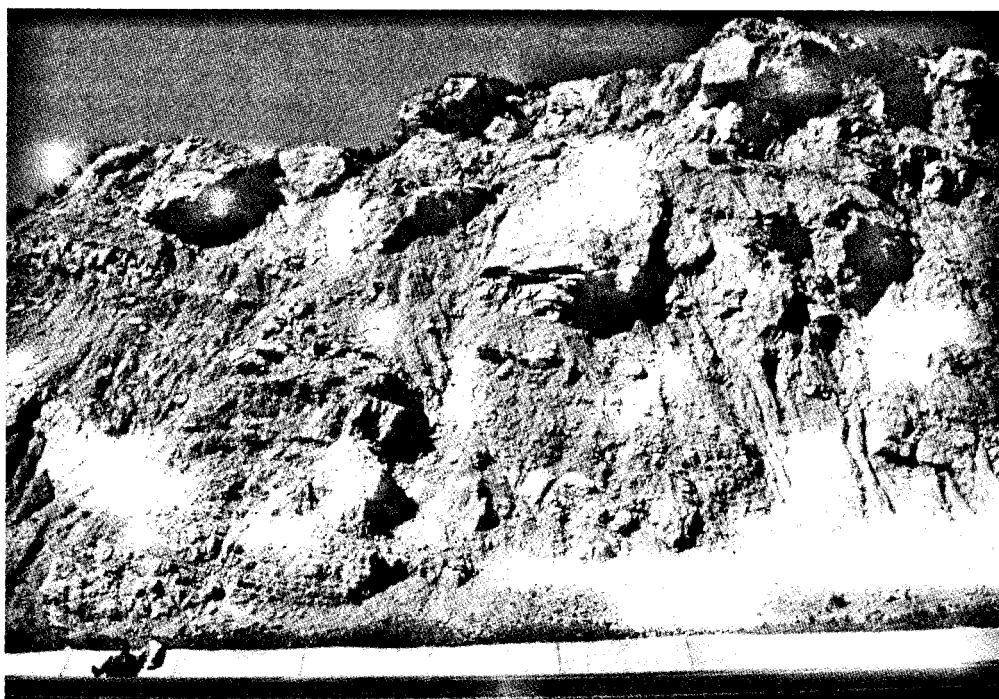


Figura 14. Talud inestable.

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

ITC/TUD INGENIERÍA GEOLÓGICA		CARACTERIZACIÓN DE FRENTE EXPUESTO				SISTEMA SSPC			
CALCULADO POR: ZZ		FECHA: 10/04/96		HORA: 16:00		Exposición nº: ejemplo (talud antiguo)			
CONDICIONES METEOROLÓGICAS			LOCALIZACIÓN		Mapa nº: 472-I				
Sol: Nublado/medio/soleado		Coordenadas:		Norte:		4558.85			
Lluvia: seco/flojísima/ligera/fuerte				Este:		321.725			
MÉTODO DE EXCAVACIÓN (ME)				DIMENSIONES/ACCESIBILIDAD					
(Puntear) Martillo Manual ✓ 1.00 Martillo neumático 0.76 Voladora de precorte/recorte 0.99 Voladora convencional con resultado: - Bueno 0.77 - Discontinuidades abiertas 0.75 - Bloques dislocados 0.72 - Roca intacta fracturada 0.67 - Roca intacta triturada 0.62				Tamaño de la exposición: (m)		l: 200	l: 5	d: 50	
				Plano: (m)		l: 200	l: 5	d: 50	
				Accesibilidad:		Mala/media/buena			
NOMBRE DE LA FORMACIÓN: Unidades estratificadas delgadas ty 23									
DESCRIPCIÓN (BS 5930:1981)									
Color: Marrón claro		Tamaño de grano: Fino		Estructura y textura: Estratificación delgada, tabular pequeña		Meteorización: Ligera			
						Nombre: Caliza y dolomita			
RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA (IRS)(puntear)					Número de muestra(s):		Meteorización (ME)		
< 1.25 MPa 1.25 - 5 MPa 5 - 12.5 MPa 12.5 - 50 MPa 50 - 100 MPa 100 - 200 MPa ✓ > 200 MPa		Desmoronamiento con la mano Pequeños fragmentos rotos fácilmente con las manos Pequeños fragmentos rotos con las manos Trozos rotos por fuertes golpes de martillo Trozos sólo desconchados por fuertes golpes Sonido metálico con golpes de martillo. saltan chips					(Puntear) Inalterado 1.00 Ligera ✓ 0.95 Moderada 0.90 Alta 0.62 Total 0.35		
Discontinuidades B: Estratificación, C: Cliveje, J: Diaclasas				β_1	J_2	J_3	4	5	
Dirección buzamiento (grados)				0.82	310	244	Talud existente?		
Buzamiento (grados)				30	30	62	Dirección buzamiento/ buzamiento		
Espaciamiento (DS)				0.03	0.03	0.03	180/70		
Persistencia		A lo largo del rumbo (m)		> 200	> 14	0.2	Altura: 5 m		
		A lo largo del buzamiento (m)		> 50	> 20	0.2	Estabilidad (puntear)		
ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES									
Rugosidad a gran escala (Ra) (Sobre una superficie entre 0,2x0,2 y 1x 1 m ²)		Onduladas: 1.00 Ligera/mente onduladas: 0.95 Curvadas: 0.85 Ligera/mente curvadas: 0.80 Plana: 0.75		f	0.75	0.75	Estable ✓ 1 Problemas pequeños 2 Problemas grandes 3		
Rugosidad a pequeña escala (Ri) (Sobre una superficie de 0,2x0,2 m ²)		Escarpada rugosa: 0.95 Escarpada suave: 0.90 Escarpada fina: 0.85 Rugosa ondulada: 0.80 Ondulada suavemente: 0.75 Ondulada fina: 0.70 Planar rugoso: 0.65 Planar suave: 0.60 Planar fina: 0.55		0.75	0.6	0.86	Notas: 1) Para "relleno de salbanda > irregularidades" y "material fluyente" la rugosidad a pequeña escala = 0.55. 2) Si la rugosidad es anisotrópica (e.g. estrías, etc.) la rugosidad será evaluada perpendicular y paralela a la rugosidad y las direcciones indicadas en esta manera. 3) Discontinuidades no ajustadas serán marcadas en la columna de rugosidad.		
Material de relleno (m)		Relleno cementado/compactado 1.07 Sin relleno-superficie manchada 1.00 Material cizallado & reblandecido e.g. libre de arcilla, talco, etc. Grueso 0.95, medio 0.90, Fino 0.85 Material cizallado blando, e.g. arcilla, talco, etc. Grueso 0.75, medio 0.65, Fino 0.50 Salbanda < irregularidades: 0.42 Salbanda > irregularidades: 0.17 Material fluyente: 0.05		0.55	0.55	f			
Karst (Ka)		Ninguno Karst 1.00, Karst 0.92		0.92	0.92	0.92			
SUCCEPTIBILIDAD A LA METEORIZACIÓN (SW)						Observaciones:			
Grado de meteorización		Fecha de excavación		Observaciones:					
Ligera		> 40 años		Cortes antiguos hechos a mano o con pequeñas excavadoras					

Figura 15. Ejemplo de caracterización de frente expuesto.

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

ITC/TUD INGENIERÍA GEOLÓGICA		PROBABILIDAD DE ESTABILIDAD DEL TALUD			SISTEMA SSPC
CALCULADO POR: ZZ		FECHA: 10/04/96		Talud nº: ejemplo (talud nuevo)	
		Localización	Mapa nº:	472-I	
		Coordenadas:	Norte:	4558,85	
			Este:	321,725	
DETALLE DEL TALUD					
MÉTODO DE EXCAVACIÓN (SME)		METEORIZACIÓN (SWE)		Dirección buzamiento del talud (grados):	
(Puntear)		(Puntear)		180	
Natural/Manual	1,00	(Mallado)	1,00		
Martillo neumático	0,78	Ligera	0,95	Buzamiento del talud (grados):	
Voladura de precisión/recorte	0,99	Moderada	0,90	70	
Voladura convencional con resultado:		Alta	0,82	Altura (Hslope) (m)	
• Bueno	0,77	Total	0,35	13,8	
• Discontinuidades abiertas	0,75	Nota: SWE para "tipo suelo", e.g. Suelo cementado, etc.			
• Bloques dislocados	0,72				
• Roca intacta fracturada	0,67				
• Roca intacta sana	0,63				
NOMBRE DE LA UNIDAD DEL TALUD: H Pizarra (Carbonífero), v. cilvaje delgado					
ESTABILIDAD INDEPENDIENTE DE LA ORIENTACIÓN					
Resistencia de la roca intacta (SIRS)					
SIRS = RIRS (A partir del macizo rocoso de referencia) x SWE (Talud meteorizado) = 158 · 0,94 =				142	
ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES (SSPA)					
SSPA = RSPA (A partir del macizo rocoso de referencia) x SWE (Talud meteorizado) x Método de excavación del talud x SME (Método de excavación del talud)				SSPA = 0,046 · 0,90 · 0,72 =	
				0,03	
ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (SCD)					
SCD = RDC (A partir del macizo rocoso de referencia) x SWE (Talud meteorizado)				SCD = 0,464 · 0,90 =	
				0,418	
COHESIÓN Y FRICCIÓN DE LA UNIDAD DEL TALUD (SFRI & SCOH)					
$\phi_{\text{puz}} = \text{SIRS} \cdot 0,2417 + \text{SSPA} \cdot 52,12 + \text{SCD} \cdot 5,779$ (si SIRS > 132 MPa entonces SIRS = 132)		$\phi_{\text{puz}} = 132 \cdot 0,2417 + 0,030 \cdot 52,12 + 0,418 \cdot 5,779 =$		34°	
$\text{coh}_{\text{puz}} = \text{SIRS} \cdot 94,27 + \text{SSPA} \cdot 28629 + \text{SCD} \cdot 3593$ (si SIRS > 132 MPa entonces SIRS = 132)		$\text{coh}_{\text{puz}} = 132 \cdot 94,27 + 0,030 \cdot 28629 + 0,418 \cdot 3593 =$		14146 Pa	
SI SFRI < Buzamiento del talud: ALTURA MÁXIMA DEL TALUD (Hmax)					
Altura máxima permisible: $H_{\text{max}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \text{coh}_{\text{puz}} \cdot \text{sen}(\text{Buz. talud}) \cdot \cos(\text{L}_{\text{puz}}) / (1 - \cos(\text{Buz. talud} - \text{L}_{\text{puz}}))$				$H_{\text{max}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 14146 \cdot \text{sen}(70^\circ) \cdot \cos(34^\circ) / (1 - \cos(70^\circ - 34^\circ)) =$	
				8,3 m	
Ratios:				$\text{L}_{\text{puz}} / \text{Buz. talud} = 34^\circ / 70^\circ =$	
				0,49	
				$H_{\text{max}} / H_{\text{slope}} = 8,3 \text{ m} / 13,8 \text{ m} =$	
				0,67	
Probabilidad de estabilidad: Si SFRI > Probabilidad buzamiento del talud = 100 % entonces usar figura para estabilidad independiente de la orientación:					
8 %					
ORIENTACIÓN DEPENDIENTE DE LA ESTABILIDAD					
DISCONTINUIDADES	β_1	β_2	β_3	4	5
Dirección del buzamiento (grados)	0,82	310	244		
Buzamiento (grados)	30	87	62		
Con, contra, vertical o igual	a	v	w		
AP (grados)	-5	-85	40		
RTC	0,38	0,23	0,66		
STC = RTC · sqrt(1,452 - 1220 · e ^{-A} (SWE))	0,37	0,22	0,65		
Probabilidad de estabilidad:	100 %	100 %	97 %	%	%
Determinación de la estabilidad según orientación: ϕ = Dirección de buzamiento de talud, τ = Dirección del buzamiento de discontinuidades, $\delta = \phi - \tau = AP = \arctan(\cos \delta \cdot \tan \beta)$					
Cálculo de AP: (Si Buzamiento de discontinuidades, ϕ = Dirección de buzamiento de talud, τ = Dirección del buzamiento de discontinuidades, $\delta = \phi - \tau = AP = \arctan(\cos \delta \cdot \tan \beta)$)					
Estabilidad	Deslizamiento	Vuelco	Estabilidad	Deslizamiento	Vuelco
AP > 84° o AP < -84°	vertical	100 %	100 %	100 %	100 %
(Buzamiento talud + 5°) < AP < 84°	con	100 %	100 %	100 %	Usar gráfico de vuelco
(Buzamiento talud + 5°) < AP < (Buzamiento talud + 5°)	con	100 %	100 %	100 %	Usar gráfico de vuelco
0° < AP < (Buzamiento talud + 5°)	con	Usar gráfico deslizamiento	100 %		

(Gráficos: Deslizamiento Fig. 9; Vuelco Fig. 10; Estabilidad Independiente de la orientación Fig. 11).

Figura 16. Ejemplo de cálculo del macizo rocoso de referencia.

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

ITC/TUD INGENIERÍA GEOLÓGICA		CÁLCULO DEL MACIZO ROCOSO DE REFERENCIA			SISTEMA SSPC		
CALCULADO POR: ZZ	FECHA: 10/04/96	Frente expuesto: Ejemplo					
NOMBRE DE LA UNIDAD DE REFERENCIA: Unidades estratigráficas delgadas tg Z3							
RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA (RIRS)							
RIRS = RIRS (MPa) / WE (Correcciones por meteorización) = 150 / 0,95 =						158	
ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES (RSPA)							
DISCONTINUIDADES	β_i	J_1	J_2	4	5		
Dirección del buzamiento (grados)	0,82	310	244				
Buzamiento (grados)	30	87	62				
Espaciamiento (DS)	0,03	0,04	0,03				
El parámetro espaciamiento (SPA) es calculado a partir de las tres familias de discontinuidades con el menor espaciamiento con la figura siguiente						0,046	
						<p>SPA (ver figura adjunta) = Factor 1 · Factor 2 · Factor 3 = 0,43 · 0,30 · 0,34 = 0,043</p> <p>Corregido por la meteorización y por el método de excavación.</p> <p>RSPA = SPA / (WE · ME) (Con un máximo de 1,00)</p> <p>RSPA = 0,043 / (0,95 · 0,99) =</p>	
ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (RTC & RCD)							
DISCONTINUIDADES	β	J_1	J_2	4	5		
Rugosidad a gran escala (R1)	1	0,75	0,75				
Rugosidad a pequeña escala (Ra)	0,75	0,6	0,95				
Material de relleno (Im)	0,55	0,55	1				
Karst (Ka)	0,92	0,92	0,92				
Total (R1 · Ra · Im · Ka = TC)	0,38	0,23	0,66				
RTC	0,38	0,23	0,66				
RTC es el estado de las discontinuidades para una discontinuidad (familia) en el macizo rocoso de referencia corregido por la meteorización de las discontinuidades RTC = TC / sqrt(1,452 · 1,229 · e ² · (WE))							
Ponderación por espaciamiento:							
$CD = \frac{TC_1}{DS_1} \cdot \frac{TC_2}{DS_2} \cdot \frac{TC_3}{DS_3} = \frac{0,38}{0,03} \cdot \frac{0,23}{0,04} \cdot \frac{0,66}{0,03} = 0,44$							
Corregido por meteorización: RCD (con un máximo de 1,0165) = CD / WE = 0,44 / 0,95 =						0,46	
COHESIÓN Y FRICCIÓN UNITARIA DE REFERENCIA (RFRI & RCOH)							
$\Phi_{\text{RIRS}} = \text{RIRS} \cdot 0,2417 + \text{RSPA} \cdot 52,12 + \text{RCD} \cdot 5,778$ (si RIRS > 132 MPa entonces RIRS = 132)				$\Phi_{\text{RIRS}} = 132 \cdot 0,2417 + 0,046 \cdot 52,12 + 0,46 \cdot 5,778 =$			37°
$\Phi_{\text{RIRS}} = \text{RIRS} \cdot 94,27 + \text{RSPA} \cdot 28629 + \text{RCD} \cdot 3593$ (si RIRS > 132 MPa entonces RIRS = 132)				$\Phi_{\text{RIRS}} = 132 \cdot 94,27 + 0,046 \cdot 28629 + 0,46 \cdot 3593 =$			15413 Pa
Notas:							
1) Para IRS (resistencia de la roca intacta) tomar las medidas de los valores inferiores y superiores de clase.							
2) Los valores de rugosidad serán reducidos o la resistencia al corte tendrá que ser ensayada si la rugosidad de las discontinuidades no es la adecuada.							
3) WE: 1,00 para unidades "tipo suelo", e.g. suelos cementados, etc.							
4) Si se presentan más de tres discontinuidades en el macizo rocoso entonces la cohesión y la fricción del macizo rocoso de referencia será calculada a partir de la combinación de esas tres discontinuidades que resulten con los valores de la cohesión y fricción del macizo rocoso.							

Figura 17. Ejemplo de cálculo de estabilidad de talud.

Las direcciones de los taludes nuevos y antiguos son aproximadamente iguales y la posición general de ambos es comparable.

Tanto los taludes antiguos como los nuevos fueron excavados en una montaña que se allana sobre ellos. Cualquier caudal superficial de escorrentía de un fuerte aguacero es por esto probablemente igual en ambos tipos de taludes. Además, con respecto a la geología (fallas, etc.), no existen diferencias notables entre los taludes de carretera nuevos y los antiguos.

El nuevo talud es claramente inestable, grandes zonas muestran erosión en cárcavas y la erosión de las unidades de estratificación delgada causante de sobreexcavación de horizontes estratificados de mayor potencia, haciendo a éstos inestables. La impresión general del talud es extremadamente mala. Del examen más pormenorizado, se observa que esas partes del talud que aparentan ser "suelo" son en efecto las unidades de estratificación delgadas, meteorizadas moderadamente a intensamente, y que son sólo parcialmente cubiertas por horizontes de suelo transportados de las partes más altas del talud. En algunos lugares las unidades de estratificación delgada podrían ser clasificadas como moderadamente a fuertemente meteorizadas en, al menos, 0,5 a 1 m en el macizo rocoso y en particular de las unidades de estratificación delgada han sido alteradas por el método de excavación. Las discontinuidades han sido abiertas, los bloques han sido desplazados y en algunas localizaciones la roca intacta ha sido fracturada u ocasionalmente triturada como resultado de la voladura.

Esto ha alterado la estructura del macizo rocoso tan severamente que el agua puede fluir cerca de la superficie del talud y provocar la meteorización de las unidades de estratificación delgada. El talud está en riesgo debido al deslizamiento o vuelco a lo largo de discontinuidades.

El sistema SSPC da una probabilidad de estabilidad de $> 95\%$ para los desmontes antiguos con cara de talud de 70° y una altura de 5 m. Las mismas características del macizo rocoso fueron usadas para los taludes nuevos, estando asimismo los taludes en el mismo macizo rocoso de "referencia" con las unidades de estratificación delgada consideradas. Para el nuevo desmonte con una altura de 13,8 m, un grado "moderado" de meteorización del macizo rocoso y "bloques dislocados" debido a la voladura, la evaluación de la estabilidad fue aproximadamente el 8% para un talud de 70° . Esto está de acuerdo con la realidad tal como presenta el estado actual (2000) del macizo rocoso que claramente no puede soportar un talud de 70° . De acuerdo con el sistema SSPC, la estabilidad será alcanzada si el ángulo de talud es rebajado hasta alcanzar aproximadamente 45° .

Este ejemplo muestra que la clasificación SSPC de estabilidad de taludes es también aplicable en situaciones en las que la estabilidad está gobernada por daños debidos al método de excavación y a la influencia de la meteorización. Si el talud ha sido diseñado usando el sistema SSPC, el incremento de meteorización no habrá sido anticipado como los antiguos desmontes no lo muestran. Sin embargo, los nuevos desmontes no habrán sido nunca diseñados con un frente de 80° si fuera anticipado que quizá podrían ser usadas voladuras pobremente ejecutadas.

13. DISCUSIÓN

El sistema SSPC (aunque se basa en una gran variación de litologías y tipos de macizos rocosos) ha sido desarrollado en una región particular, en un clima particular y con tipos particulares de litologías y macizos rocosos, etc. Como para todo sistema empírico, utilizar el sistema SSPC con macizos rocosos en un ambiente que sea muy diferente implica un riesgo.

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

La calidad de un macizo rocoso consistente en una fuerte heterogeneidad, intensamente plegado o roca fallada presenta un problema especial. El macizo rocoso será dividido en unidades geotécnicas en las que las propiedades del macizo son aproximadamente homogéneas y pueden ser calculadas para cada unidad geotécnica específica. Si es imposible distinguir las unidades geotécnicas con un pequeño rango de valores permitidos para las propiedades, debido al tamaño limitado de las áreas heterogéneas, puede usarse el peor caso de parámetros del macizo rocoso, aunque esto podría probablemente conducir a una evaluación conservadora.

Los tipos de roca que son muy fácilmente deformables (yesos, sales, etc.) fueron incluidos en el desarrollo del sistema SSPC. Sin embargo, la estabilidad de taludes en macizos rocosos conteniendo yesos está más influenciada por la erosión y la meteorización (en particular por la disolución del yeso) que por la deformación mecánica de las rocas. El sistema SSPC no puede ser empleado si la resistencia del macizo rocoso está gobernada por la deformación de la roca intacta.

Se debe señalar que la clasificación SSPC fue desarrollada para taludes planos uniformes, mientras que los taludes reales (y en particular los excavados deficientemente) contienen resaltes, nichos, entrantes, etc., que pueden permitir movimientos en direcciones que no serían posibles si el talud fuera un plano continuo. Los desprendimientos de rocas resultantes en tales taludes irregulares no son infrecuentes. Generalmente, los errores cometidos por los estudiantes en la evaluación de los datos de campo del macizo rocoso son mayores que los debidos a ingenieros geomecánicos experimentados.

Consecuentemente, las probabilidades de estabilidad de talud calculadas por el sistema SSPC pueden ser conservadoras. En opinión de los autores, no es problema del sistema SSPC que sea utilizado por usuarios inexpertos y expertos. El personal experimentado observará que los resultados basados en el sistema SSPC pueden ser conservadores e interpretar los resultados adecuadamente, mientras que es altamente improbable que una persona inexperta esté capacitada para reconocer que los resultados son demasiado optimistas y sea capaz de corregirlos por esto. El conservadurismo de los resultados es por esto considerado como ventajoso.

El sistema SSPC no evalúa la estabilidad de los taludes que están sometidos a tensiones externas, tales como tensiones tectónicas o tensiones inducidas por una gran montaña o valle sobre el talud investigado.

Un criterio para el pandeo como el propuesto para el criterio de deslizamiento o el criterio de vuelco no ha sido desarrollado. Esto está en concordancia con las observaciones de campo en el área de investigación donde el pandeo como causa de rotura de un talud es rara vez encontrado en casi ninguno de los taludes siendo suficientemente altos y escarpados para que esto ocurra.

14. CONCLUSIONES

El sistema de Clasificación Probabilística de Estabilidad de Taludes (SSPC) proporciona una mejor evaluación de la estabilidad de taludes que otros sistemas de clasificación de estabilidad debido a que la aproximación entre etapas permite la incorporación de la meteorización pasada y futura, los daños debidos a los métodos de excavación y la asignación de probabilidades a los diferentes mecanismos de rotura. La repetibilidad y fiabilidad de la caracterización de las propiedades del macizo rocoso son generalmente buenas, ya que la mayor dificultad para medir o parámetros ambiguos tales como el RQD, presencia de agua y ensayos sofisticados (RCS, ensayos de corte directo, etc.) no se requieren. El sistema SSPC fue desarrollado

utilizando datos de 184 taludes estables e inestables. La cantidad de datos y el hecho de que éstos fueran recopilados por un gran número de personas en diferentes momentos elimina un diseño sesgado en el sistema.

La susceptibilidad a la meteorización es el factor principal para la estabilidad de un talud en un macizo rocoso propenso a la meteorización en la vida ingenieril del talud. El sistema SSPC cuantifica la resistencia futura de una discontinuidad y del macizo rocoso si el grado futuro del macizo rocoso puede predecirse. Esta metodología es independiente del clima. El sistema ha sido recientemente utilizado con buenos resultados en Austria, Sudáfrica, Nueva Zelanda (Lindsay et al., 2000) y en las Antillas Holandesas (Rijkers y Hack, 2000) y se considera que puede ser también aplicable a otras regiones.

15. BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, N.R., LIEN, R. & LUNDE, J. (1974): "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". Rock Mechanics. 6. Springer Verlag. pp. 189-236.
- BARTON, N.R. (1976): "Recent experiences with the Q system of tunnel support design". Pro. Symp. on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg. ed. Bieniawski. Balkema, Rotterdam. pp. 107-117.
- BARTON, N.R. (1988): "Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-system". Proc. Symp. Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publication 984. ed. Louis Kirkaldie. publ. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. pp. 59-88.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989): "Engineering Rock Mass Classifications". Wiley, New York. 251 pp.
- BS 5930 (1981, 1999): "Code of practice for site investigations". British Standards Institution, London.
- DAVIS, J.C. (1986): "Statistics and data analyses in geology". Wiley, New York. 646 pp.
- GABRIELSEN, R.H. (1990): "Characteristics of joints and faults". Rock Joints. eds Barton & Stephansson. Balkema, Rotterdam. pp. 11-17.
- GOODMAN, R.E. (1989): "Introduction to Rock Mechanics". Wiley, New York. 562 pp.
- HACK, H.R.G.K. & PRICE, D.G. (1995): "Determination of discontinuity friction by rock mass classification". Proc. 8th Cong. on Rock Mechanics. ISRM. Tokyo, Japan. Balkema, Rotterdam. pp. 23-27.
- HACK, H.R.G.K. & PRICE, D.G. (1997): "Quantification of weathering". IAEG symposium "Engineering Geology and the Environment", Athens, Greece, 23-27 June.
- HACK, H.R.G.K. (1998): "Slope stability probability classification". SSPC. 2nd edition. ITC, Enschede, The Netherlands. ISBN 90 6164 154 3. 258 pp.
- HAINES, A. & TERBRUGGE, P.J. (1991): "Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems". Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics. ISRM. Aachen, Germany. 2, ed. Wittke W. publ. Balkema, Rotterdam. pp. 887-892.

Una nueva aproximación a la clasificación probabilística de estabilidad de taludes (SSPC)

- HAMMERSLEY, J.M. & HANSCOMBE, D.C. (1964).: "Monte Carlo methods". Methuen. London. Wiley, New York. 178 pp.
- HOEK, E. & BRAY, J.W. (1981).: "Rock slope engineering". 3rd edition. Inst. of Mining and Metallurgy, London. 358 pp.
- ISRM (1978).: "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses". Int. Journal Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanical Abstr. 15, pp. 319 -368.
- ISRM (1981).: "Rock Characterization". Testing and Monitoring, ISRM suggested methods. ed. E.T. Brown. Pergamon Press, Oxford. 211 pp.
- LAUBSCHER, D.H. (1990).: "A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design". Journal South African Inst. of Mining and Metallurgy. 90, No. 10, pp. 257-273.
- MAERZ, N.H. (2000).: "Highway rock cut stability assessment in rock masses not conducive to stability calculations". Proc. 51 Annual Highway Geology Symposium, Seattle. pp. 249-259.
- MARDIA, K.V. (1972).: "Statistics of directional data". Academic Press Ltd., London. 357 pp.
- MARQUARDT, D.W. (1963).: "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters". Journal of the Soc. for Industrial and Appl. Math., 2, pp. 431-441.
- NILSEN, B. (2000).: "New trends in rock slope stability analyses". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58, pp. 173-178
- RENGERS, N. (1971).: "Unebenheit und Reibungswiderstand von Gesteinstrennflächen". Dr.Ing. Dissertation. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe. (47). 129 pp.
- ROMANA, M. (1985).: "New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes". Proc. Int. Symp. Rock Mechanics. Mining Civ. Works. ISRM.: "Zacatecas", Mexico. pp 59-63.
- ROMANA, M. (1991).: "SMR classification". Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics. ISRM. Aachen, Germany. 2. ed. Wittke W. Balkema, Rotterdam. pp. 955-960.
- RIJKERS, R. & HACK, H.R.G.K. (2000).: "Geomechanical analysis of volcanic rock on the island of Saba (Netherlands Antilles)". Proc. GeoEng2000, Melbourne. CD-Rom.
- SELBY, M.J. (1980).: "A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand". Zeitschrift für Geomorphologie. 23. pp. 31-51.
- SELBY, M.J. (1982).: "Hillslope materials and processes". Oxford University Press, Oxford. 264 pp.
- SHUK, T. (1994).: "Key elements and applications of the natural slope methodology" (NSM) with some emphasis on slope stability aspects. Proc. 4th South American Congr. on Rock Mechanics. Santiago de Chile. pp. 255-266.

- TAYLOR, H.W. (1980).: "A geomechanics classification applied to mining problems in the Shabanie and King mines,1 Zimbabwe. M". Phil. Thesis. Univ. of Rhodesia. April.
- TERZAGHI, R.D. (1965).: "Sources of error in joint surveys". Geotechnique. (15). The Institution of Civil Engineers, London. pp. 287-304.