

Equilibrio de un talud rocoso con discontinuidades planas (*)

Por MIGUEL FERNANDEZ BOLLO
FERNANDO HACAR RODRIGUEZ
JOSE MARIA HACAR RODRIGUEZ

La estabilidad de taludes rocosos ha sido objeto de investigaciones concretadas en modelos de aplicación a diferentes casos. Con el presente estudio se aborda el problema de medios rocosos con diaclasado o estratificación plana y rotura por vuelco de bloques, presentándose un programa de cálculos en ordenador que se aplica a un ejemplo práctico.

1. INTRODUCCION

Los fenómenos de inestabilidad taludes han sido objeto de estudio de notables investigaciones desde ya hace bastante tiempo. Podemos destacar como pioneros y muy importantes para la geotécnica los trabajos en 1773 de Charles Augustin Coulomb (véase el trabajo de Kerisel, 1974, con motivo del bicentenario del ensayo de Coulomb).

Por observaciones en campo se ha podido constatar que el colapso de un talud sucede de una u otra manera según sea el tipo de terreno (configuración geológica, características geotécnicas...). Con estas observaciones se han desarrollado una serie de modelos. Aplicando el que convenga en cada caso, podrá analizarse la estabilidad de la ladera en cuestión.

En la literatura geotécnica existen numerosos trabajos en los que se citan determinadas hipótesis respecto al modo en que sucede la rotura (véase por ejemplo Jiménez Salas, Justo, Serrano, 1976, y Mézdi, 1974) de acuerdo con los diferentes tipos de terrenos que comprenda el talud estudiado.

Es clásica la ordenación basada en métodos de cálculo aplicables a terrenos que se comportan como suelos y métodos de empleo en taludes rocosos. No es nuestro propósito entrar en la polémica sobre los diferentes casos en que resulta razonable aplicar uno u otro método, ni tampoco discutir los casos intermedios, como pueden ser taludes rocosos con gran erosión, en los que podría aplicarse con éxito un método típico de suelos o rocas, de acuerdo con las condiciones particulares

del talud objeto de estudio. En cualquier caso concreto debemos recurrir fundamentalmente a la observación y toma de datos en campo, que nos permiten definir con la precisión necesaria exigida por el estudio las características para un análisis de estabilidad, pudiendo entonces tomar la decisión de cuál es el método que más se ajuste al caso en cuestión, conociendo en todo momento sus limitaciones.

En el caso concreto de los taludes rocosos en medios con sistemas de diaclasado o estratificación plana, Goodman y Bray (1976) han desarrollado una tipología de casos de rotura. También son interesantes las aportaciones de otros autores, como Oyanguren (1980), Hoek, Bray (1977). Hemos considerado el modelo más característico del estudio de vuelco de bloques el presentado en la figura 1.

Como indican estos autores, la rotura por vuelco suele producirse a velocidades reducidas, pero sin embargo pueden verse involucrados grandes volú-

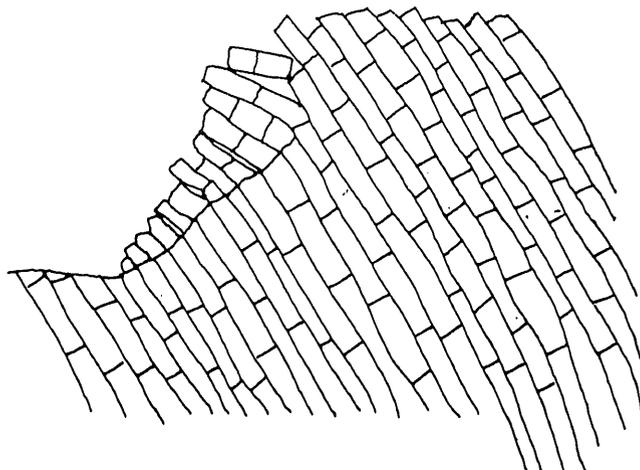


Figura 1.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1982.

menes, por lo que este tipo de rotura cobra gran importancia.

Cuando las litoclasas dividen a la masa rocosa en columnas, buzando hacia el interior del macizo, y si la roca es suficientemente rígida, la rotura, comenzando por la inestabilidad de las cortas columnas del pie (causada por excavaciones o por la erosión), hace que los bloques de más arriba se desplacen, terminando por ser los bloques del pie los que soportan a todo el talud. Este tipo de rotura es progresiva, pudiendo extenderse hasta afectar masas importantes.

Hemos considerado el método propuesto por Goodman y Bray para el estudio de la estabilidad por vuelco de bloques. Expondremos las bases de un programa de cálculo en ordenador, explicando con detalle algunos pormenores del mismo, pues permitirán comprender con mayor profundidad la filosofía de este método. Asimismo señalaremos los estudios que pueden hacerse para conseguir una mejor adaptación de este modelo a la realidad.

Queremos señalar que en el citado trabajo de Goodman y Bray (1976) se sintetizan los principales métodos para el análisis de los diferentes tipos de rotura por vuelco, indicando las referencias donde podrán consultarse (siendo de destacar los trabajos de Ashby, 1971, Cundall, 1971, 1975).

2. DEFINICION GENERAL DEL TALUD

Para la aplicación del método y del programa que hemos desarrollado, supondremos que el macizo es bidimensional y similar al indicado en la figura 2. Consideremos una faja de 1 m. de anchura, definida por el ángulo del talud Θ , el plano horizontal inferior, y el superior, inclinado un ángulo μ con la horizontal. Asimismo lo supondremos dividido en columnas sensibles paralelas y de igual anchura, formados como consecuencia de la existencia de unas litoclasas con buzamiento ψ .

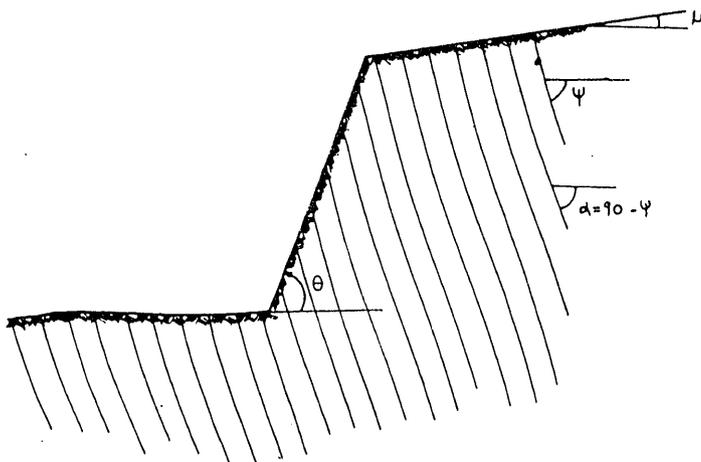


Figura 2.

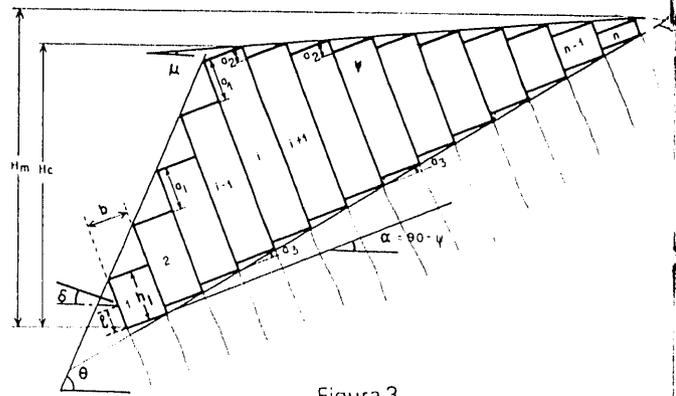


Figura 3.

Admitiremos la existencia de discontinuidades transversales en esas columnas, de manera que resulte un sistema de bloques prismáticos análogos al de la figura 3.

Este modelo geométrico resulta una aproximación razonable para ambientes similares al de la figura 1.

3. GEOMETRIA DEL TALUD

Queda definida con los siguientes datos de entrada:

Θ = Ángulo del talud.

μ = Ángulo del plano que limita superiormente al talud.

b = Anchura de bloques (consideramos todos los bloques de igual espesor).

β = Ángulo de la recta base de bloques. Es el que forma con la horizontal la recta que une los vértices de los escalones que sirven de apoyo a los bloques.

ψ = Buzamiento de las discontinuidades que definen las columnas.

h_1 = Longitud del primer bloque.

H = Altura del talud medida en campo (ver observaciones más adelante).

De la figura 3 se deduce:

$$a_1 = b \cdot \operatorname{tg}(\Theta - \alpha)$$

$$a_2 = b \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \mu)$$

$$a_3 = b \cdot \operatorname{tg}(\beta - \alpha)$$

Siendo

$$\alpha = 90^\circ - \psi$$

obsérvese que a_3 representa la altura de los escalones de la base de bloques, a_1 los escalones de la parte superior de los bloques hasta el $j = i$ (llamando

Desde ahora i al bloque vértice, es decir, el que ocupa la arista superior exterior del talud), y a_2 esos mismos escalones desde $j = i$ hasta $j = n$.

Para los cálculos se va a suponer un número entero de bloques, es decir, hay que discretizar la geometría del talud, definida por los datos Θ , μ , b , β , ψ , h_1 y H . Hemos optado por el criterio de modificar mínimamente la altura real del talud, definiendo la «altura calculada», esto es, la que debe tener para comprender un número exacto de bloques (sin modificar ninguno de los restantes datos geométricos).

Por este motivo denominamos altura aproximada del vértice el valor medido en el campo, y H_c a la altura calculada. La diferencia entre ambas será pequeña y su trascendencia en el cálculo computable. Numeraremos los bloques de 1 a n , comenzando por el pie del talud. El lugar ocupado por el bloque vértice (que hemos convenido en llamar bloque i), es:

$$i = \text{entero} \left[\frac{H + (a_1 - h_1) \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sin \alpha - a_1 \cdot \cos \alpha} + 0,5 \right]$$

Donde h_1 es la altura del primer bloque.

La altura del talud, que hemos llamado altura calculada,

$$H_c = i \cdot b \cdot \sin \alpha + [h_1 + (i - 1) a_1] \cdot \cos \alpha$$

y el número total de bloques será:

$$n = \text{entero} \left[\frac{H_m - b \cdot \sin \alpha}{\sqrt{b^2 - a_3^2} \cdot \sin \beta} + 1 \right]$$

Siendo H_m la altura máxima (véase la figura 3), igual a:

$$= \frac{\text{tg } \beta (x_1 \cdot \text{tg } \mu - H_c) + b \cdot \text{tg } \mu (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \text{tg } \beta)}{\text{tg } \mu - \text{tg } \beta}$$

$$= i \cdot b \cdot \cos \alpha - [(i - 1) \cdot a_1 + h_1] \cdot \sin \alpha$$

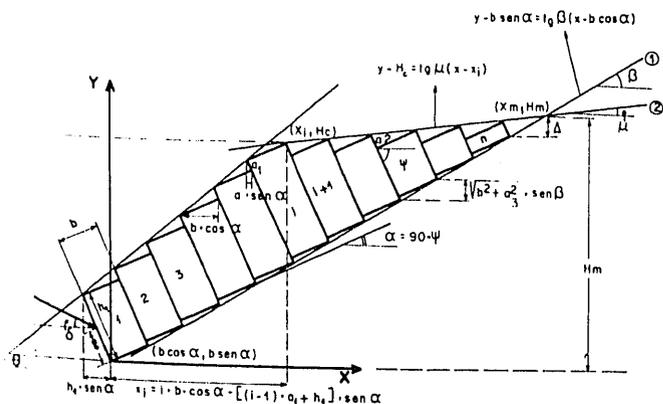


Figura 4.

Estas determinaciones pueden también deducirse del esquema de la figura 4.

Definida de esta manera la geometría del talud, podremos programar sencillamente su trazado.

4. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN BLOQUE AISLADO

En algunos de los modelos propuestos en la bibliografía adjunta, la consideración del equilibrio del bloque prismático apoyado de un plano inclinado se realiza despreciando la resistencia a tracción en las juntas.

En la figura 5 se representa el bloque de anchura b , altura h y peso W . Si en la base de ese bloque el ángulo de rozamiento es Φ

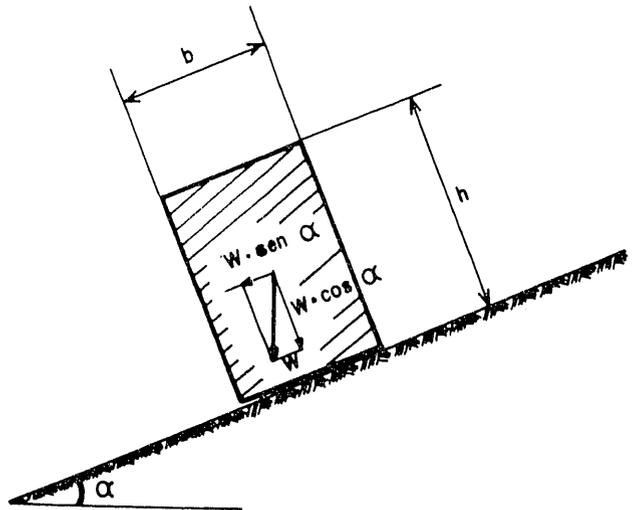


Figura 5.

(y no existe cohesión), por las ecuaciones elementales de la estática, tenemos:

$$\begin{aligned} W \cdot \cos \alpha \cdot \text{tg } \Phi &= W \cdot \sin \alpha \dots & \text{tg } \Phi &= \text{tg } \alpha \\ W \cdot \cos \alpha \cdot h/2 &= W \cdot \sin \alpha \cdot b/2 & \text{tg } \alpha &= b/h \end{aligned}$$

Estas dos ecuaciones permiten distinguir las situaciones siguientes:

$\Phi > \alpha$ no existe deslizamiento:

- $\text{tg } \alpha < b/h$ no existe vuelco
- $\text{tg } \alpha > b/h$ existe vuelco.

$\Phi < \alpha$ existe deslizamiento:

- $\text{tg } \alpha < b/h$ no existe vuelco
- $\text{tg } \alpha > b/h$ existe vuelco.

5. ESTABILIDAD DE UN CONJUNTO DE BLOQUES

En la figura 3 y 4 hemos indicado la metodología para discretizar el talud.

Considerando el conjunto de bloques (figura 4) en general, el bloque j estará sometido a las acciones que le ejercen los dos bloques adyacentes, $j-1$ y $j+1$. Analizando todas las fuerzas que actúan sobre ese bloque, nos proponemos determinar si es estable, vuelca o desliza.

Según los tipos de contacto podemos distinguir, a efectos de programación, cinco categorías de bloque:

1. Bloque superior: $j = n$ (libre de toda carga por su parte superior).
2. Bloques intermedios entre el superior y el bloque vértice: $j > i, j \neq n$
3. Bloque vértice: $j = i$.
4. Bloques intermedios entre el bloque vértice y el bloque primero: $J < i, j \neq 1$.
5. Bloque primero: $j = 1$. Suponiendo que está sometido en su cara inferior a la acción de un anclaje.

En la figura 6 señalamos estos cinco casos mostrando claramente sus diferencias.

Caso $j=1$

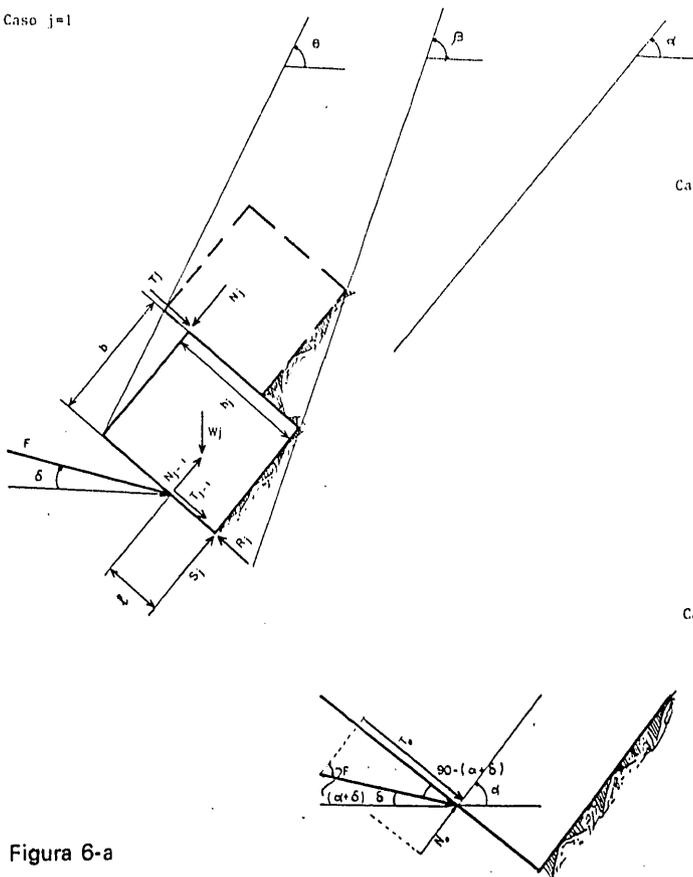
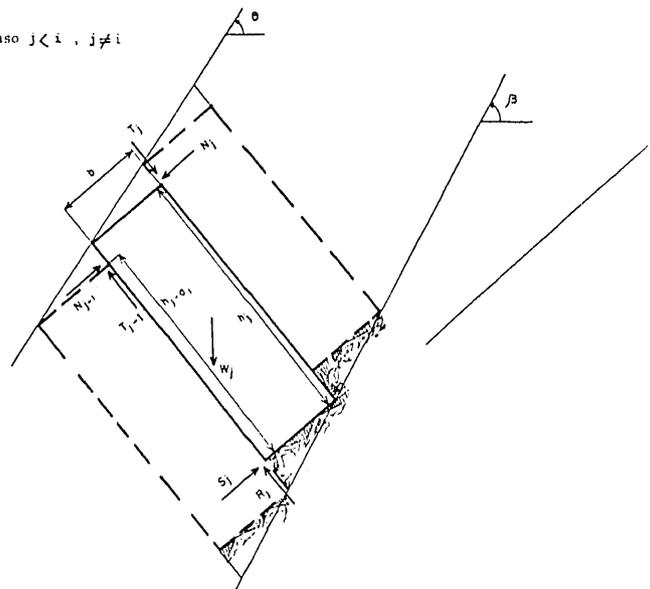


Figura 6-a

Caso $j < i, j \neq i$



Caso $j=i$

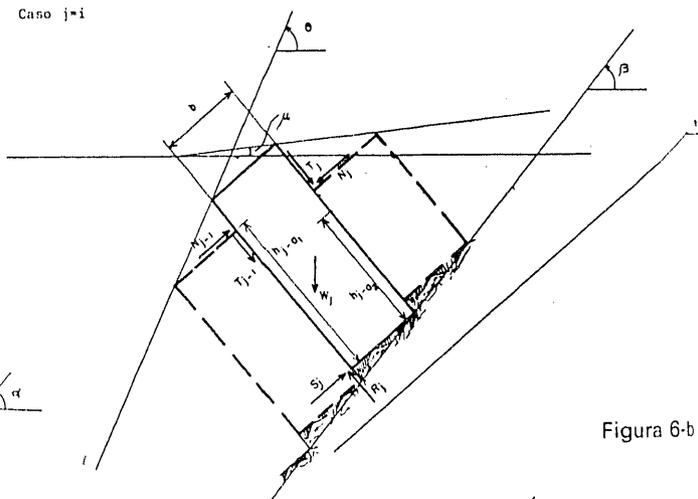
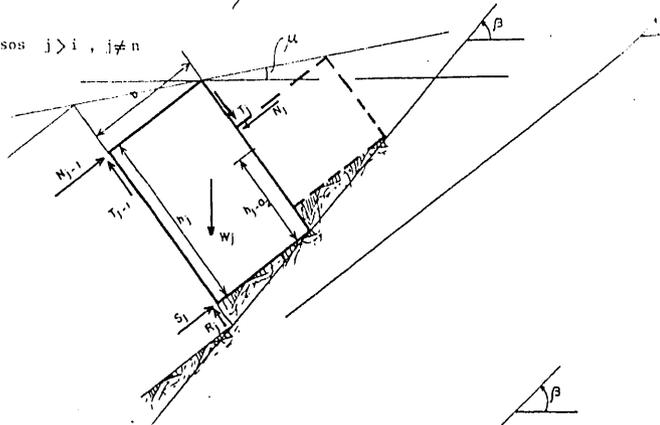


Figura 6-b

Casos $j > i, j \neq n$



Caso singular $j=n$

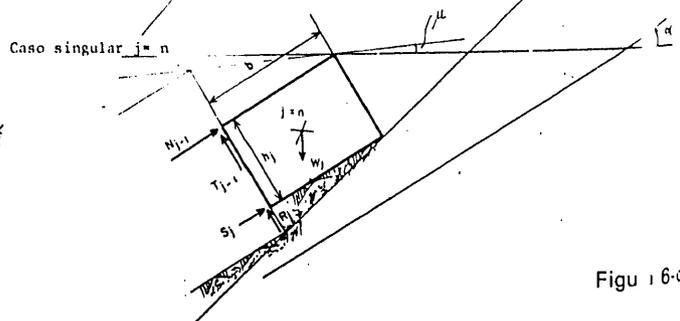


Figura 6-c

Por tomar un ejemplo, consideremos un bloque cualquiera como el de la figura 7. En general, este bloque estará sometido a las siguientes fuerzas:

- Peso propio: W_j
- Acción ejercida en la base del bloque, que descompuesta en la normal y tangencial a esa base resulta R_j y S_j respectivamente.
- Acción ejercida por el bloque inferior, N_{j-1} y T_{j-1} .
- Acción ejercida por el bloque superior, N_j y T_j .

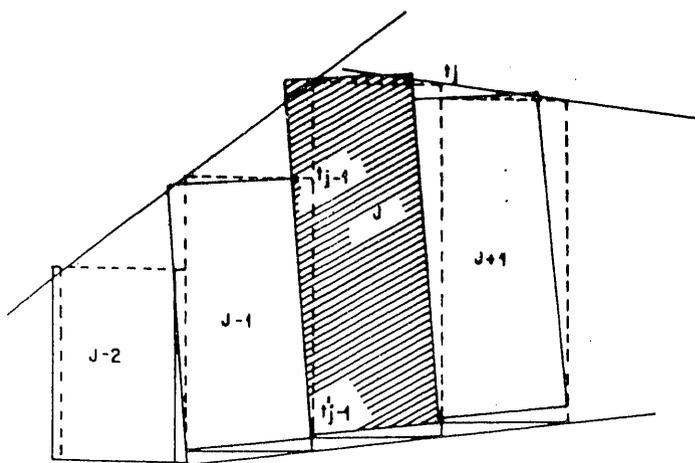


Figura 7.

Por el momento, vamos a suponer conocida la fuerza transmitida por el bloque superior, esto es, N_j y T_j .

A la vista de la figura 7, en la que se indica la geometría en caso de vuelco, si el bloque objeto de estudio vuelca, podemos suponer que las acciones en la base están concentradas en el vértice inferior de dicha base (punto t'_{j-1}), así como las acciones ejercidas por el bloque inferior podemos suponerlas aplicadas en el vértice superior de ese bloque (punto t_{j-1}). Con esto resulta el bloque j solicitado por las fuerzas indicadas en la figura 8. Por las tres ecuaciones del equilibrio, resulta:

$$-\sum M_{t'_{j-1}} = 0$$

$$N_{j-1,v} = \frac{N_j (b \cdot \text{tg } \Phi - h_j) + W_j/2 (b \cdot \text{tg } \Phi - h_j)}{-h_j + a_1}$$

$$-\sum F = 0$$

$$R_j = \text{tg } \Phi (N_j - N_{j-1,v}) + W_j \cdot \cos \alpha$$

$$S_j = (N_j - N_{j-1,v}) + W_j \cdot \text{sen } \alpha$$

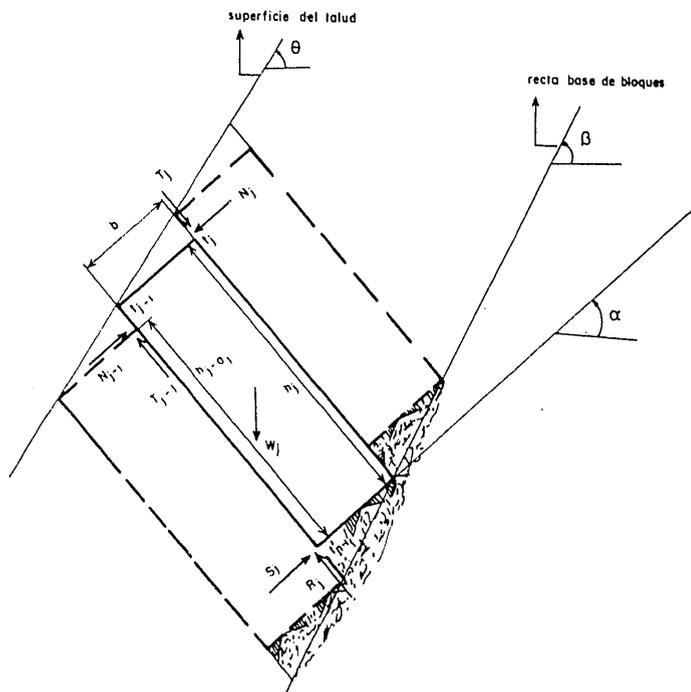


Figura 8.

Para calcular esas expresiones se ha supuesto:

$$T_{j-1,v} = N_{j-1,v} \cdot \text{tg } \Phi$$

Hipótesis que puede admitirse considerando que antes de que se produzca el vuelco, debe ir precedido de un deslizamiento entre la cara inferior del bloque j y su adyacente del $j-1$.

De las expresiones anteriores obtenemos el valor de la figura $N_{j-1,v}$ necesaria para el equilibrio al vuelco del bloque.

También deberá cumplirse que $R_j > 0$, así como $S_j/R_j \ll \text{tg } \Phi$.

Por el contrario, si el bloque j desliza, las fuerzas en la base, así como las transmitidas por el bloque inferior ($j-1$) ya no es exacto suponerlos aplicados en t_{j-1} y t'_{j-1} apareciendo como nuevas incógnitas los brazos de estas fuerzas. Suponiendo:

$$T_{j-1,d} = N_{j-1,d} \cdot \text{tg } \Phi$$

obtenemos de la condición $\sum F = 0$:

$$R_j = \text{tg } \Phi (N_j - N_{j-1,d}) + W_j \cdot \cos \alpha$$

$$S_j = (N_j - N_{j-1,d}) + W_j \cdot \text{sen } \alpha$$

y si desliza podemos suponer $S_j = R_j \cdot \text{tg } \Phi$, de donde obtenemos:

$$N_{j-1,d} = N_j - \frac{W_j (\cos \alpha \cdot \text{tg } \Phi - \text{sen } \alpha)}{1 - \text{tg}^2 \Phi}$$

EQUILIBRIO DE UN TALUD ROCOSO CON DISCONTINUIDADES PLANAS

Así pues, si del análisis de un bloque cualquiera resultasen $N_{j-1,v}$ y $N_{j-1,d}$ negativos diremos que el bloque j es estable y no transmite fuerza alguna al siguiente bloque; si $N_{j-1,v} > N_{j-1,d}$ el bloque j tiende a volcar, transmitiendo al siguiente bloque $N_{j-1,v}$; si $N_{j-1,v} < N_{j-1,d}$ el bloque j tiende a deslizar y transmite el siguiente bloque $N_{j-1,d}$.

6. ANCLAJE Y ESTABILIDAD DEL CONJUNTO DE BLOQUES

En el programa que hemos desarrollado, se ha considerado la existencia de un anclaje actuando directamente en el bloque del pie del talud (figura 4). Por la forma en que ha sido desarrollado el pro-

grama, la fuerza transmitida a este anclaje será una fuerza F_a indicadora de la estabilidad del conjunto de bloques. El primer bloque transmitirá al anclaje una fuerza F_a (que es igual a la proyección de la fuerza del anclaje situado a una altura l y con un ángulo δ con la horizontal, proyección con la normal a la cara exterior del bloque primero).

Esta fuerza es la mayor de las dos obtenidas $N_{j-1,v}$ y $N_{j-1,d}$. Si el anclaje es capaz de soportar esa fuerza el talud se encontrará en equilibrio. Por esta razón, si la fuerza N_0 es igual o menor que cero, el talud será estable (es decir, para mantenerlo estable no hará falta anclaje), y si resultase N_0 mayor que cero el talud se mantendría estable sólo con un anclaje capaz de soportar la carga antes citada.

Figura 9.

DENSIDAD ROCA	ANGULO TALUD	ANGULO BERMA	ANCHURA BLOQUES	ANGULO BASE	NORMAL BUZAM.	LONGITUD BLOQUE 1	BLOQUE VERTICE	
2.55	75.00	10.00	10.00	45.00	30.00	7.63	4	
ANGULOS DE ROZAMIENTO INTERNO		ANCLAJE		ALTURA		ALTURA		
INICIAL	FINAL	INCR.	REAL	DISTANCIA	ANGULO	VERTICE	CALCULADA	ALTURA MAXIMA
35.00	40.00	2.00	38.00	3.00	30.00	52.63	52.58	61.24
PHI= 35.00	NUMERO	NJ, V	NJ, D	R	S	S/R	TIPO	
	8	-84.88	-21.32	88.45	51.07	0.58	E	
	7	-44.60	-54.96	228.00	131.64	0.58	E	
	6	-4.32	-88.59	367.55	212.21	0.58	E	
	5	35.97	-122.23	481.92	256.81	0.53	V	
	4	150.57	-119.90	566.41	258.74	0.46	V	
	3	242.63	33.68	420.53	187.95	0.45	V	
	2	345.48	164.70	251.31	83.83	0.33	V	
	1	-118.89	70.60	525.86	368.21	0.70	D	
RAZON ENTRE LAS TANGENTES DEL PHI REAL Y EL ENSAYADO:						1.11579		
PHI= 37.00	NUMERO	NJ, V	NJ, D	R	S	S/R	TIPO	
	8	-84.88	-36.06	88.45	51.07	0.58	E	
	7	-44.60	-92.96	228.00	131.64	0.58	E	
	6	-4.32	-149.86	367.55	212.21	0.58	E	
	5	35.97	-206.76	480.00	256.81	0.54	V	
	4	149.58	-227.69	561.04	259.74	0.46	V	
	3	234.72	-48.17	420.83	194.87	0.46	V	
	2	305.47	102.89	270.01	115.92	0.43	V	
	1	-177.46	44.91	469.64	353.90	0.75	D	
RAZON ENTRE LAS TANGENTES DEL PHI REAL Y EL ENSAYADO:						1.03680		
PHI= 39.00	NUMERO	NJ, V	NJ, D	R	S	S/R	TIPO	
	8	-84.88	-59.72	88.45	51.07	0.58	E	
	7	-44.60	-153.94	228.00	131.64	0.58	E	
	6	-4.32	-248.17	367.55	212.21	0.58	E	
	5	35.97	-342.39	477.98	256.81	0.54	V	
	4	148.53	-400.64	555.50	260.79	0.47	V	
	3	226.47	-178.93	421.88	202.07	0.48	V	
	2	265.40	8.16	291.80	147.74	0.51	V	
	1	-224.33	22.39	415.36	336.35	0.81	D	
RAZON ENTRE LAS TANGENTES DEL PHI REAL Y EL ENSAYADO:						0.96481		

una disposición geométrica similar a la de la figura 4, siendo $l = 3,00$ m. y $\delta = 30^\circ$.

En los tres casos tratados el talud resulta inestable. Para $\phi = 35^\circ$ se requiere un anclaje capaz de transmitir una fuerza en proyección normal a la cara del bloque de 70,60 Tm., descendiendo a 22,39 Tm. para $\phi = 39^\circ$.

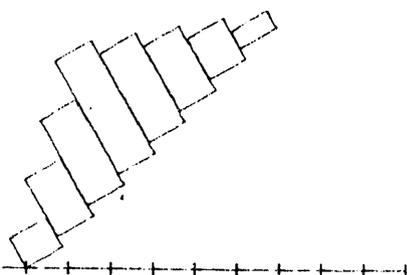
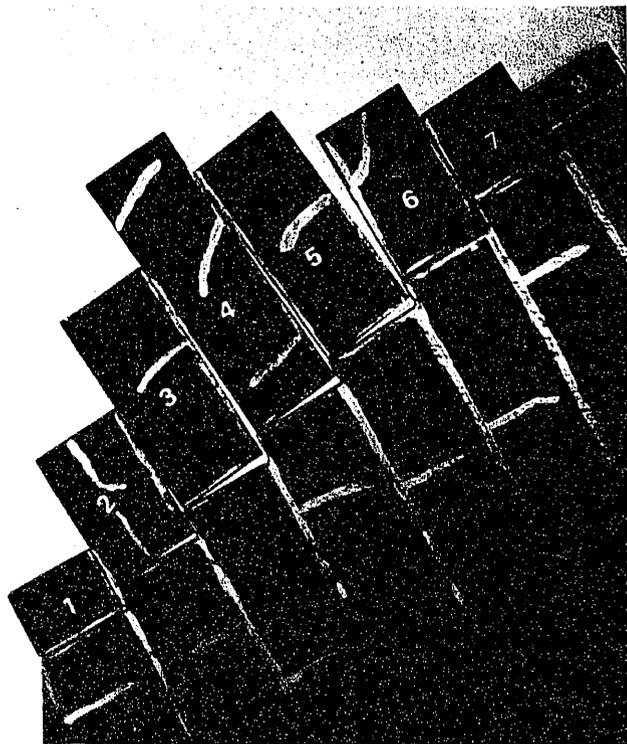


Figura 10



7. EJEMPLO

Para contemplar el estudio realizado, se ha desarrollado un ejemplo numérico, cuyos resultados se indican en las figuras 9 y 10.

Se trata de un talud con una altura de 52,63 metros (altura medida en campo) ángulo de 75° , limitado en su parte superior por un plano inclinado 30° con la horizontal; la roca que compone el talud tiene un peso específico de $2,55 \text{ T/m}^3$. El macizo presenta discontinuidades en un buzamiento de 60° y frecuencia de 10 metros.

Siendo el ángulo de razonamiento de las discontinuidades de 38° , se ha querido estudiar el comportamiento del macizo, suponiendo algunos otros valores de este ángulo dentro de un entorno de 38° , 37° y 39° (figura 9).

En los cálculos se determina la resistencia mínima que debe tener un anclaje con punto de aplicación en el bloque primero (pie del talud), con

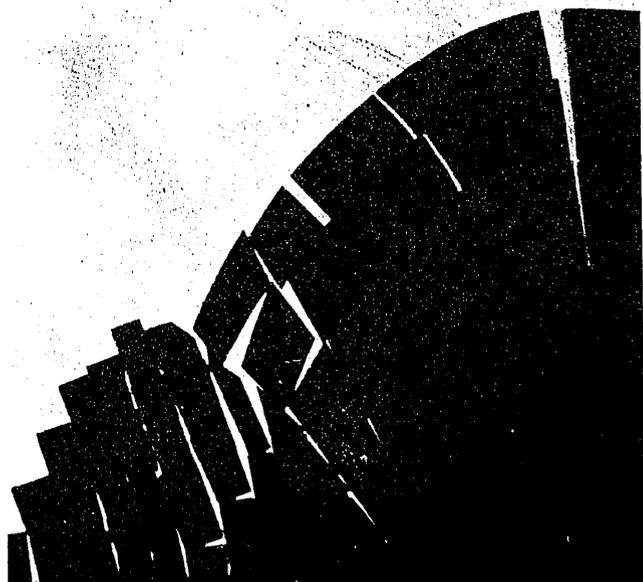


Figura 11.—Fotografía cortesía de Geoprín, S. A.

El listado de la figura 9, además proporciona la situación de equilibrio de cada bloque, deduciéndose con facilidad la fuerza que, por medio de un anclaje, debería ser aplicada a un bloque cualquiera para asegurar la estabilidad tanto de ese bloque como de los superiores.

El empleo del programa de ordenador, permite investigar con gran facilidad el efecto que produce en la estabilidad los cambios en la geometría del talud o de las características geológicas y geotécnicas así como puede determinarse la posición más favorable en que debe ser colocado un anclaje para asegurar la estabilidad del macizo.

8. CONCLUSION

Nos hemos ocupado de la estabilidad de taludes rocosos frente a la posible rotura por vuelco de bloques. En el modelo se ha desarrollado y realizado una serie de hipótesis, unas afectando a la geometría del talud, otras a la rigidez e indeformidad de la roca, y por último otras afectando a las fuerzas de contacto de los diferentes bloques que componen el talud.

Para terminar, queremos únicamente mencionar la existencia de un simple modelo a escala, que en una primera aproximación permite reproducir la dinámica del colapso por vuelco de un talud rocoso.

Las fotografías de la figura 11 corresponden a dos taludes estudiados con este modelo.

TRABAJOS DE INTERES

- GEOPRIN, S. A.—Recopilación, análisis crítico y simplificación funcional de los métodos empleados en el diseño de excavaciones a cielo abierto. 1980.
En éste estudio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) se elaboraron las bases que en éste artículo desarrollamos. El citado estudio puede ser consultado en los archivos de dicho centro.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASHBY, J.—Sliding and toppling modes of failure in model and jointed rock slopes. 1971.
Imperial College, Royal School of Mines, Londres.
- CUNDALL, P. A.—A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. 1971.
Symposium on Rock Fracture, Nancy, Francia.
- CUNDALL, P. A.; AVOGELE, M. D.; FAIRRHURST, C.—Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data. 1975.
16th. Symposium on Rock Mechanics, Minesota.
- GOODMAN, R. E. y BRAY, J. W.—Toppling of rock slopes. 1976.
Rock Engin, for foundations and slopes, Universidad de Colorado. Publicación especial de la A.S.C.E.
- HOEK, E. y Bray, J.—Rock slope engineering. 1977.
The Institution of Mining and Metallurgy, Londres.
- JIMENES ZALAS, J. A.; JUSTO, J. L. y SERRANO, A. A.—Geotecnia y cimientos II. 1976.
Editorial Rueda.
- KERISEL, J.—Bicentenario del ensayo de 1773 de Charles Augustin Coulomb. 1973.
Travaux.
- KEZDI, A.—Handbook of soil mechanics. 1974.
Elsevier.
- RAMIREZ OYANGUREN y otros.—Diseño de taludes en rocas competentes. 1980.
Fundación Gómez Pardo, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid.