

Una Extensión de la Metodología de Bieniawski-Romana para estimar la Estabilidad de Taludes.

Ing. Gianfranco Perri A.

RESUMEN

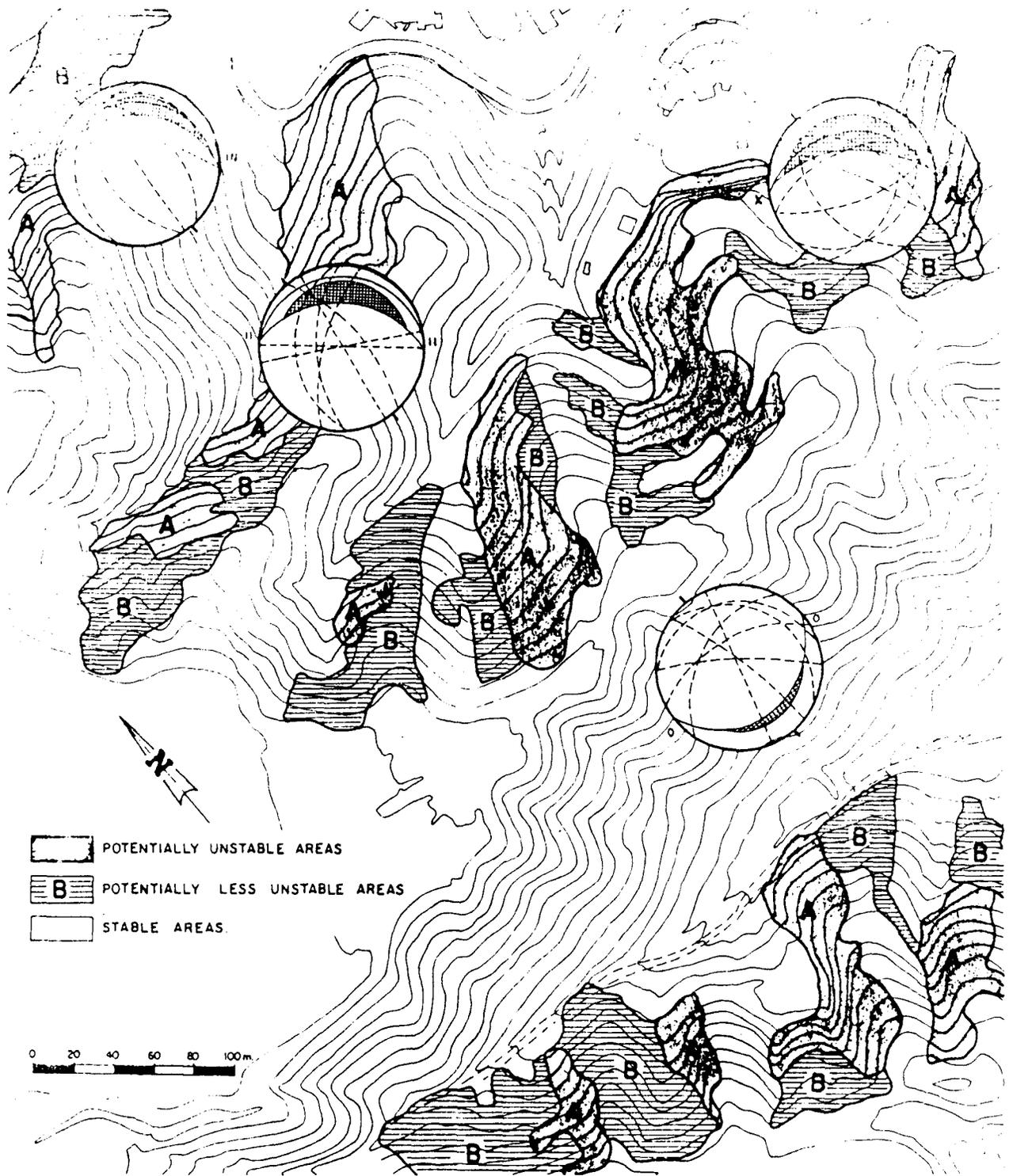
Después de una breve descripción de la clasificación geomecánica para macizos rocosos de Bieniawski y después de comentar la metodología de Romana para estimar la estabilidad de taludes en rocas basada en una modificación de la original clasificación de Bieniawski, se propone una extensión de tal metodología a objeto de hacerla más realísticamente aplicable a taludes en macizos rocosos no necesariamente altamente anisótropos. Se introduce un factor correctivo denominado factor de anisotropía cuyo valor numérico es correlacionable con la relación entre los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades y los de la matriz rocosa de un determinado macizo. Finalmente se muestra un ejemplo de aplicación gráfico-numérica de la extensión propuesta a la metodología de Bieniawski-Romana.

INTRODUCCION

Cuando se ejecuta un estudio geotécnico de taludes relativo a áreas muy extensas como es típicamente el caso para los proyectos viales o ferrocarrileros así como para los proyectos de grandes desarrollos urbanos, es generalmente imposible disponer de una información extremadamente detallada sobre las condiciones geotécnicas de todos y cada uno de los taludes a diseñar y es por lo tanto una práctica usualmente aceptada, el proceder (por lo menos en las etapas iniciales de un proyecto y previamente a su ejecución) en términos de sectorización de las áreas a ser afectadas, asociándolas y discriminándolas en base a la macro información disponible según sea el caso (aspectos topográficos, geomorfológicos, litológicos, geoestructurales, etc.) elaborándose de tal manera diseños tipo para los taludes involucrados en el proyecto (figura 1, Perri 1983).

Dentro de este contexto resulta interesante, para el caso de taludes en rocas, el recurso metodológico a las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos, muy difundidas hoy en día en la práctica ingenieril y especialmente aplicadas con éxito en la ingeniería de túneles.

Una de las clasificaciones más conocidas es la denominada de Bieniawski (1979) que prevé el cálculo del paramento RMR (Rocks Mass Rating) como suma de cinco parámetros parciales, cada uno de los



Partial representation of the "The Maps of Stability Analysis". The original map was elaborated on a scale of 1:2000. The total area was approximately one million square meters.

FIGURA 1

cuales es relativo a un factor de determinante contribución a la calidad geomecánica de un macizo rocoso (Resistencia de la roca intacta - RQD - Espaciamiento entre discontinuidades - Condición de las discontinuidades y Factor hidrológico). Luego el valor numérico básico del RMR (BRMR teóricamente comprendido entre 8 y 100 con su valor máximo correspondiente a una calidad geomecánica optima), es eventualmente corregido (disminuido de hasta 60 unidades) para tomar en cuenta la eventual influencia negativa que sobre la estabilidad de la estructura en objeto (túnel - fundación - talud) induce la orientación de las discontinuidades del macizo rocoso relativamente a la geometría de la estructura (tabla 1).

Bieniawski discrimina tal influencia en cinco rangos para cada tipo de estructura de manera solamente cualitativa (Muy Favorable - Favorable - Media - Desfavorable - Muy Desfavorable) y finalmente, en cuanto al resultado global de la clasificación (valor final del RMR), se ha ocupado esencialmente de su correlación práctica en el campo del diseño y construcción de túneles sin profundizar lo relativo a las aplicaciones posibles en el área del análisis diseño y construcción de cimentaciones y taludes en rocas.

METODOLOGIA DE ROMANA

Romana (1985), propuso una extensión de la clasificación de Bieniawski especialmente concebida para su aplicación al cálculo de la estabilidad de taludes en rocas. Esencialmente, Romana, analiza y cuantifica con cierto detalle el factor de corrección del RMR por influencia de la orientación relativa discontinuidades-talud.

Romana define el SMR (Slope Mass Rating), como índice final de clasificación en cinco clases (I-V) del macizo rocoso al que pertenece el talud, obtenido del restar al índice básico de Bieniawski (BRMR) la cantidad (entre 0 y 68) resultante de la aplicación de la siguiente relación (tabla 2):

$$SMR = BRMR + (F1 * F2 * F3) + F4$$

"F1" es un factor que varía de 0.15 a 1.00 y depende de la diferencia angular entre el rumbo del plano del talud y el rumbo del plano de las discontinuidades responsables de una potencial falla planar o de una potencial falla de volcamiento (valores altos de F1 corresponden a situaciones de pseudoparalelismo entre los planos del talud y de las discontinuidades).

"F2" es un factor que varía de 0.15 a 1.00 y depende del ángulo de buzamiento de las discontinuidades (para el caso de una potencial falla de volcamiento, F2 vale siempre 1.00 y para el caso de una potencial falla planar, los valores altos de F2 corresponden a ángulos altos del buzamiento de las discontinuidades).

"F3" es un factor que varía de 0 a -60 y depende de la diferencia angular entre el buzamiento del plano del talud y el buzamiento

TABLA 1

The Rock Mass Rating System (Geomechanics Classification of Rock Masses)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Ranges of Values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	For this low range, uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial compressive strength (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Rating	20	17	13	8	3			
3	Spacing of discontinuities	>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Rating	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered wall	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous			
		Rating	30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (L/min)	None	<10	10-25	25-125	>125		
		Joint water pressure Ratio Major principal stress	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing			
	Rating	15	10	7	4	0			
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS									
Strike and Dip Orientations of Discontinuities		Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable			
Ratings	Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating	100-81	80-61	60-41	40-21	<20				
Class no.	I	II	III	IV	V				
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock				
D. MEANING OF ROCK MASS CLASSES									
Class no.	I	II	III	IV	V				
Average stand-up time	20 yr for 15-m span	1 yr for 10-m span	1 wk for 5-m span	10 h for 2.5-m span	30 min for 1-m span				
Cohesion of the rock mass (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100				
Friction angle of the rock mass (deg)	>45	35-45	25-35	15-25	<15				

del plano de las discontinuidades responsables de una potencial falla planar o de una potencial falla de volcamiento (valores muy negativos de F3 corresponde a diferencias grandes entre los ángulos de buzamiento de los planos del talud y los de las discontinuidades).

"F4" es finalmente un factor que varía de 15 a -8 y depende del método de excavación del talud (valores positivos altos se refieren a taludes naturales y valores muy negativos corresponden a taludes conformados mediante voladuras no controladas).

La metodología propuesta por Romana, finalmente, se complementa con una descripción cualitativa de las cinco clases en términos de sus condiciones de estabilidad, de las potenciales tipologías de falla y de las necesidades de medidas de prevención y/o soporte (tabla 3).

EXTENSION DE LA METODOLOGIA

El análisis de los aspectos cuantitativos implícitos en la metodología propuesta por Romana para evaluar las condiciones de estabilidad de un talud basada en la clasificación geomecánica de Bieniawski oportunamente modificada según se ha comentado, revela la gran importancia (absolutamente determinante), en el resultado numérico (SMR) obtenible, del factor correctivo cinemático-estructural ($F1 \cdot F2 \cdot F3$) ligado a la orientación relativa entre talud y discontinuidades.

Lo anterior es consecuencia evidente de la suposición implícita de un comportamiento francamente anisótropo para el macizo rocoso y de un control casi total del factor cinemático-geoestructural sobre la potencial estabilidad o inestabilidad del talud; circunstancias estas, propias de situaciones caracterizadas por una matriz rocosa de elevada resistencia mecánica en contraste con una débil resistencia al corte desarrollable a lo largo de los planos de las discontinuidades presentes en el macizo.

Ahora bien, es conocido que en la práctica es común encontrar macizos rocosos que se caracterizan por un comportamiento mecánico híbrido, o intermedio a los límites de total isotropía y de franca anisotropía.

Típicos son los casos de los macizos rocosos constituidos por litologías intrínsecamente débiles aunque anisótropas, como son por ejemplo las rocas filíticas o lutíticas así como también los casos de los macizos rocosos constituidos por litología originalmente competentes pero debilitadas como consecuencia de los procesos de alteración superficial y subsuperficial que en los climas tropicales alcanzan elevadas profundidades (decenas de metros): esquistos y gneises son litologías típicas de macizos rocosos anisótropos cuya matriz rocosa puede elevarse y debilitarse tanto, que aunque se conserve la estructura exfoliada original, las fallas en los taludes bien pueden producirse en direcciones o según superficies no necesariamente controladas por los planos de anisotropía.

TABLA 2

Modification of the Geomechanics Classification for Rock Slopes

<i>Joint Adjustment Rating for Joints^b</i>						
Case		Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P	F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0°-(-10°)	<-10°
T	$\beta_j + \beta_s$	<110°	110-120°	>120°		
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60

P = plane failure. α_s = slope dip direction. α_j = joint dip direction.
 T = toppling failure. β_s = slope dip. β_j = joint dip.

<i>Adjustment Rating for Methods of Excavation of Slopes</i>					
Method	Natural Slope	Presplitting	Smooth Blasting	Regular Blasting	Deficient Blasting
F_4	+15	+10	+8	0	-8

$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$

TABLA 3

<i>Tentative Description of SMR Classes</i>					
Class No.	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Description	Very poor	Poor	Fair	Good	Very good
Stability	Very unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Fully Stable
Failures	Large planar or soil-like	Planar or large wedges	Some joints or many wedges	Some blocks	None
Support	Reexcavation	Extensive corrective	Systematic	Occasional	None

A objeto de poder extender el campo práctico de aplicación de la metodología de Bieniawski-Romana para estimar más adecuadamente la estabilidad de taludes, más allá de los casos correspondientes a macizos caracterizados por matrices rocosas muy competentes y planos de debilidad que controlen de manera rigurosa la estabilidad de los taludes, se propone la introducción de un factor de anisotropía "f" que con un valor numérico entre (0 y 1), afecte al producto (F1*F2*F3), correspondiendo el valor "1" a los macizos rocosos tipo "Bieniawski-Romana" absolutamente anisotrópicos y, valores menores a los macizos rocosos de comportamiento híbrido o hasta prácticamente isotrópico (valor "0").

De esta manera se propone la siguiente relación para el índice (SRM) de Bieniawski-Romana:

$$SRM = BRMR + f (F1 * F2 * F3) + F4$$

siendo "f" el factor de anisotropía ($0 < f < 1$) cuyo valor numérico puede luego asociarse al cociente entre parámetros de resistencia al corte a lo largo de los planos de las discontinuidades (cohesión c' y ángulo de fricción ϕ') y los correspondientes parámetros de la matriz rocosa (c y ϕ).

Por ejemplo: $f = 1 - (c'/c) + 1 - (\phi'/\phi)$; con un valor numérico comprendido entre los dos valores numéricos de cada cociente.

EJEMPLOS DE APLICACION

La metodología propuesta ha sido aplicada para la fase de ingeniería básica de un gran numero de importantes taludes de corte a conformar a lo largo de una decena de Kilómetros de topografía abrupta a lo largo de los cuales se construirá el comienzo de la línea ferrocarrilera Caracas - Puerto Cabello, en un ambiente geológico constituido por formaciones metamórficas de rocas filíticas y esquistosas con diferentes grados de meteorización.

A manera de ejemplo, se reporta el caso específico de un sector de grandes cortes para el cual se indican: la situación geoestructural del macizo rocoso (figura 2), una tabla numérica resumen del cálculo del SRM para varios taludes (tabla 4) y un esquema de la geometría prevista para uno de los cortes analizados (figura 3).

CONCLUSION

Se pretende extender el campo de aplicación de la metodología de Bieniawski Romana para estimar la estabilidad de taludes en rocas, para aquellos macizos en los cuales es solo parcial la influencia de la geoestructura en el control de la estabilidad.

SECTOR DE CORTES-PROG. 10+930,00-11+188,00

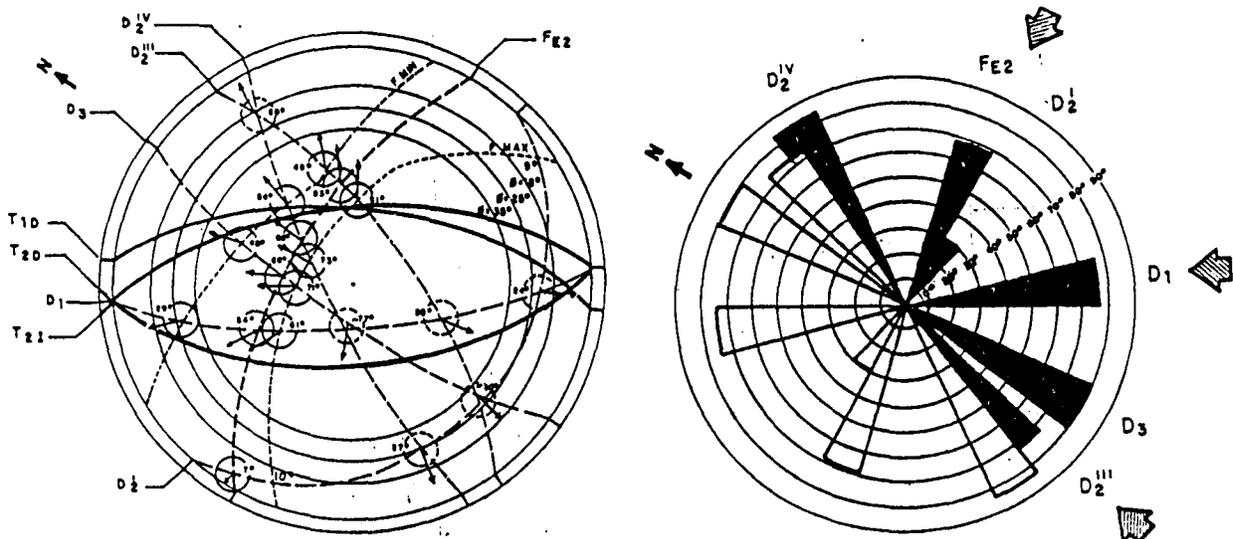
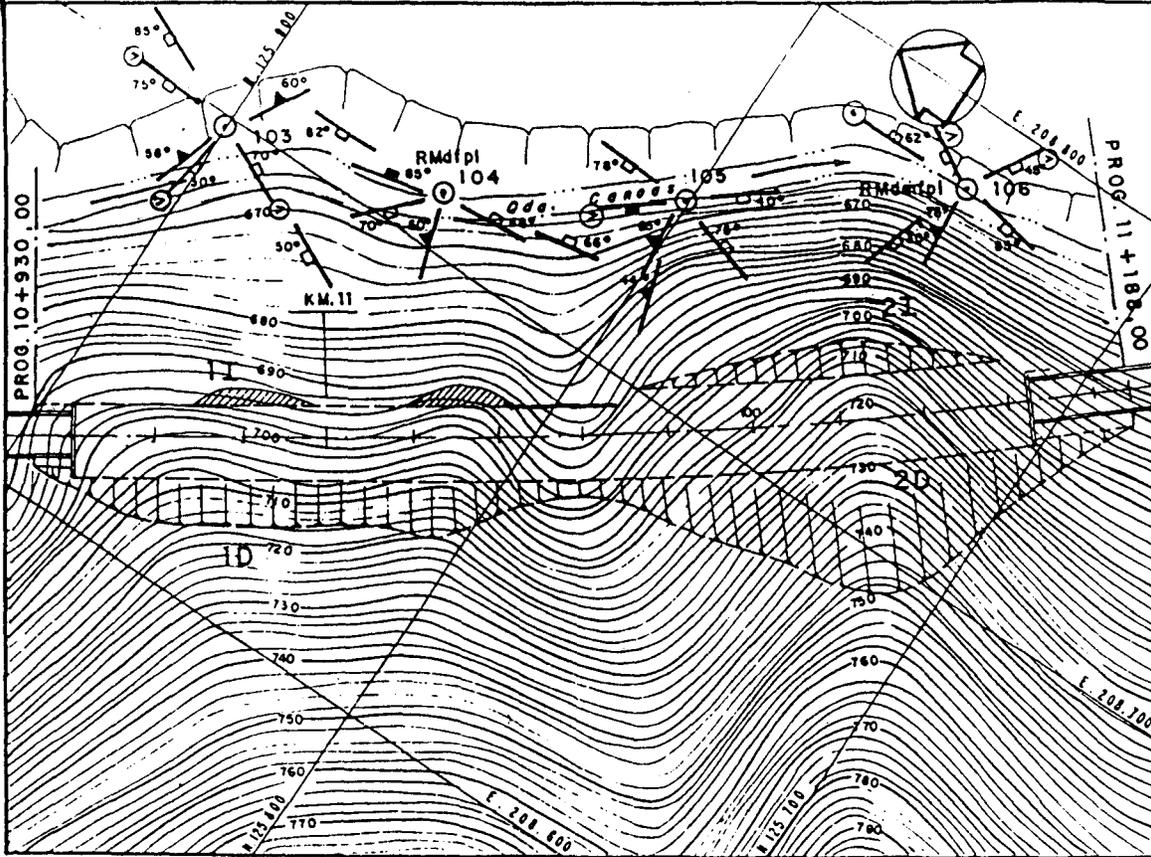
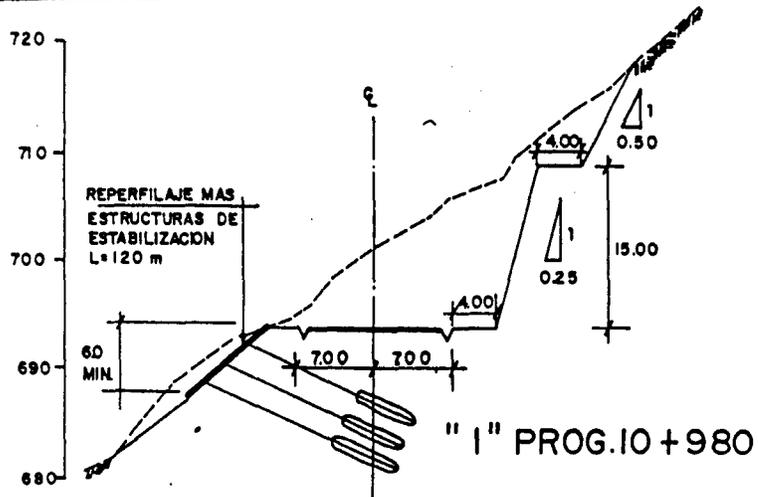


FIGURA 2

TALUD	SMR	CONDICION	RECOMENDACION
1	D 4.4 III	PARCIALMENTE ESTABLE	SOBREAÑO Y TERRACEO
1	I	INESTABLE	ESTABILIZACION



TALUD	SMR	CONDICION	RECOMENDACION
2	D 4.4 III	PARCIALMENTE ESTABLE	SOBREAÑO Y TERRACEO
2	I 2.4 IV	INESTABLE	ESTRUCTURA DE ESTABILIZACION

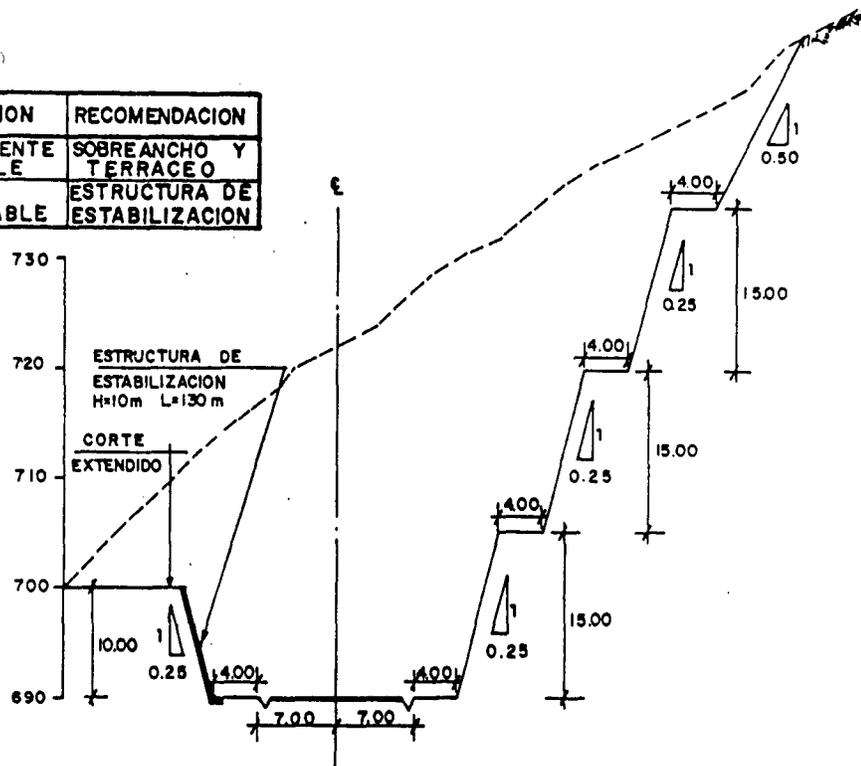


FIGURA 3

Una vez consolidado el principio cualitativo de la extensión propuesta, se deberá tratar primero de calibrar cuantitativamente el nuevo parámetro introducido (factor de anisotropía "f") y luego de verificar en la utilización práctica de la metodología, su efectividad a nivel de estudios y proyectos a escala macro, sin la pretensión (obviamente) de sustituir la inevitablemente necesaria aplicación puntual de las más clásicas y rigurosas técnicas del cálculo geotécnico para las fases ejecutivas de los taludes más importantes.

TABLA 4

SUB SECTOR CORTES PROG. 10+930 - 11+188							FACTOR DE ANISOTROPIA: 0.70																		
TALUD H m	AZIMUT TALUD	AZIMUT DISC.	DELTA AZIMUT	BUZAM. TALUD	BUZAM. DISC.	DELTA BUZAM.	PARAMETROS								CLASIFICACION										
							1	2	3	4	5	F1	F2	F3	F4	RMR	SMR	CLASE							
1D	28	62°	352°	290°	0.25:1	76°	68°	-8°	1	3	8	20	7	0.15	1.00	-50	10	39	44	III					
					0.50:1	63°		5°																	
					1.00:1	45°		23°																	
2D	60	52°	352°	300°	0.25:1	76°	68°	-8°	1	3	8	20	7	0.15	1.00	-50	10	39	44	III					
					0.50:1	63°		5°																	
					1.00:1	45°		23°																	
2I	17	232°	232°	0°	0.25:1	76°	75°	-1°	1	3	8	30	7	1.00	1.00	-50	10	49	24	IV					
					0.50:1	63°		12°																	
					1.00:1	45°		30°																	

BIBLIOGRAFIA

BIENIAWSKI, Z.T. "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application" Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Montreux, 1979, Vol. 2, pp. 51-58.

PERRI, G. "Graphical Method for the Analysis of Rock Slopes in Urban Areas" Proc. 5th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Melbourne, Australia, 1983, Vol. C, pp. 65-71.

ROMANA, M. "New Adjustment Rating for Application of the Bieniawski Classification to Slopes" Proc. Int. Symp. Rock Mech. Min. Civ. Works, ISMR, Zacatecas, Mexico, 1985, pp. 59-63.