



Cálculo de taludes de explotación para préstamos de materiales de construcción en el municipio de Pinar del Río, Cuba*

G.A. Chinthaka Ganepola

Carrera: Ingeniería geológica

Universidad de Pinar del Río (Cuba).

Resumen: En el trabajo se seleccionó un procedimiento que permitió el cálculo del talud de explotación utilizando el tabulador electrónico aplicando la Teoría de Mohr sobre el estado tensional. Se calculó el talud para: el estado límite, por encima del estado límite y tensiones horizontales igual a cero y por encima del estado límite y tensiones horizontales mayores que cero. Para pronosticar las condiciones del macizo geológico se utilizaron coeficientes de mayoración de las cargas (γ) que responden a las condiciones reológicas, sísmicas, estructurales y presencia de agua.

Palabras clave: Cálculo de taludes; préstamo de materiales; Teoría de Mohr sobre el estado tensional.

Slope calculations for construction material quarries in the municipality of Pinar del Rio, Cuba

Abstract: In this study a procedure is described which permits the slope calculation utilizing the electronic tabulator. The slope is calculated by applying the Mohr Theory on Stress: for the limit state, above the limit state & horizontal stresses equal to zero and above the limit state & horizontal stresses greater than zero. In order to forecast the conditions of the geological massif, load amplification coefficients η are used which respond to the conditions of: presence of pore water, rheology, seismic activities and structure.

Key words: Slope calculations; quarry materials; Mohr theory on stress

Introducción

Generalmente el estudio ingeniero geológico que se hace de un préstamo de materiales locales está condicionado por la utilización del mismo, lo que implica que los parámetros físicos y mecánicos determinados en el laboratorio sean diferentes. No obstante, hay un elemento común al préstamo que es el talud de explotación para el cual no se pronostica sus parámetros. Por ello se seleccionó un procedimiento que permite el cálculo del talud de explotación utilizando el tabulador electrónico aplicando la Teoría de Mohr sobre el estado tensional.

En la presente investigación, desarrollada a partir de la información de 20 préstamos realizados en la provincia de Pinar del Río, se evidenció que la información en los archivos es insuficiente. Los préstamos sobre los cuales se basa la presente investigación se muestran en la tabla 1 con sus correspondientes coordenadas.

Materiales y métodos

En la investigación se procedió a realizar el cálculo del talud utilizando el *Procedimiento para evaluar la estabilidad del macizo geológico en taludes de suelos y galerías en minas* (Martínez, 2009).

El cálculo del talud de explotación se hace necesario por la alteración del estado tensional natural del macizo geológico como consecuencia de la presencia de la obra minera.

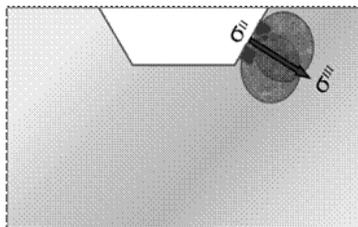


Figura 1. Zona de grietas.

El talud está sometido a un estado tensional que forma la zona de grietas, la que avanza hasta que se obtienen las condiciones de equilibrio del macizo, este criterio es aceptado universalmente y se corresponde con las mediciones ejecutadas en el campo.

En el estado límite las grietas alcanzan determinada longitud en función de la resistencia del macizo. Estas crean una zona que se ha llamado indistintamente: de deformaciones no elásticas, de destrucción, de derrumbe, etc.

La Figura 1 representa la aplicación práctica del concepto, que se realiza utilizando anclas (pernos). Es evidente que la longitud de las anclas debe sobrepasar la zona de grietas para alcanzar el macizo estable que se representa como σ^3 .

Para obtener los estados límites se ensayó a cortante directo en el laboratorio y se obtuvo la curva límite.

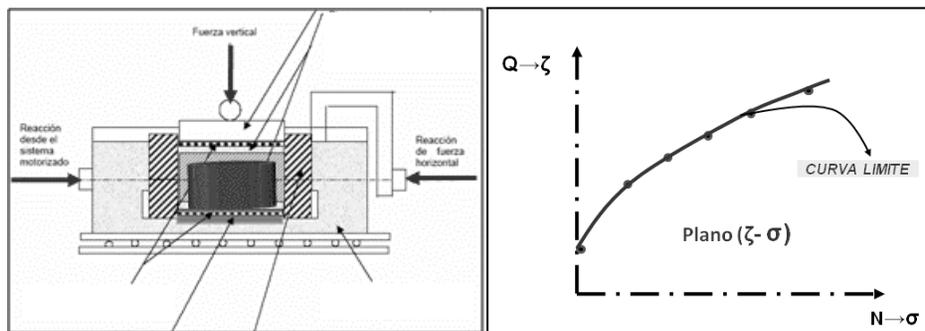


Figura 2. Ensayo a cortante directo.

La superficie de fallo se seleccionó mediante el ángulo límite β^0 el cual es función del Estado tensional aplicado en el ensayo (Figura 3).

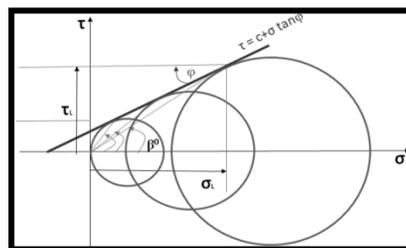


Figura 3. Valores del ángulo límite β^0 en función del estado tensional.

La muestra analizada en el laboratorio difiere del macizo geológico. Las probetas que se ensayan se obtienen de la parte más competente y se le denomina "roca intacta".

Para evaluar mecánicamente el macizo geológico fueron utilizados los siguientes coeficientes de mayoración de las cargas:

$$\eta_{agua} = \frac{\sigma_{saturado}}{\sigma_{seco}}$$

$$\eta_{reol\u00f3gico} = \frac{\sigma_{para\ un\ tiempo\ t \rightarrow infinito}}{\sigma_{para\ un\ tiempo\ t \rightarrow 0}}$$

$\eta_{s\u00edsmico} \rightarrow$ depende de las Normas de cada Regi\u00f3n

$$\eta_{estructural} = f \frac{L \rightarrow longitud\ m\u00e1xima\ de\ la\ excavaci\u00f3n}{c \rightarrow distancia\ media\ entre\ superficies\ de\ debilitamiento}$$

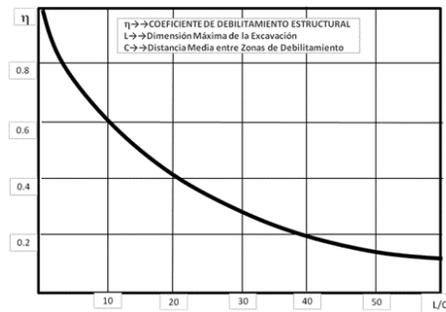


Figura 4. Determinación del coeficiente de debilitamiento estructural.

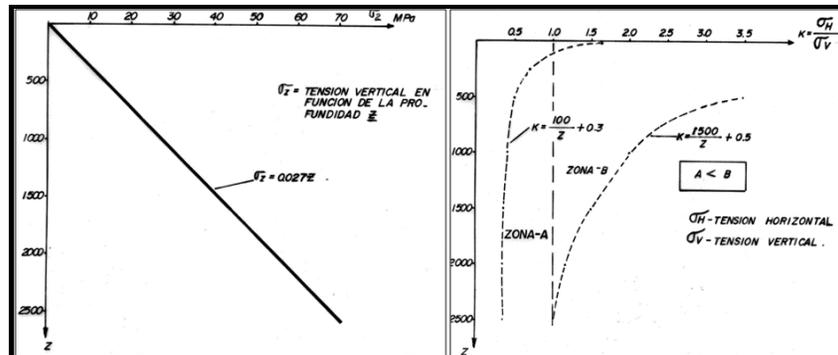


Figura 5. Comportamiento del estado tensional natural.

A la izquierda en la Figura 5 el comportamiento de la tensión vertical con relación a la profundidad (Z) se expresa mediante la ecuación: $\sigma_v = 0,027 * Z$ MPa y la relación entre las tensiones horizontales y verticales (K) a la derecha.

$$K = \frac{\sigma_H}{\sigma_v}$$

Se observa que el valor de (K) aumenta hacia la superficie y muy cerca de esta es mayor que la unidad.

Tabla 1. Ensayo a cortante directo sobre muestras remoldeadas

No	Informe	Nombre del Préstamo	X	Y	C kPa	ϕ	γ kN/m ³
1	11-140	Prest. D C/H Guamá	218600	293945	56	14	20,8
2	11-52	Prest. 3 Presa Guamá	220530	292900	30	18	20,0
3	11-190	Prest. C C/H Guamá	220950	293250	42	17	20,7
4	11-54	Prest. 10 Presa El Rancho	214800	291200	36	6	20,0
5	11-04	Prest. A ampliación Presa El Punto	237350	281250	64	23	20,0
6	11-49	Prest. 2 Presa Guamá	218250	293650	30	18	20,0
7	11-29	Prest. 1 Presa Paso Viejo	221200	287750	24	22	20,3
8	11-231	Prest. D C/H El Jíbaro	226592	299240	18	23	19,6
9	11-232	Prest. E C/H El Jíbaro	225745	299965	25	16	19,3
10	11-224	Prest. C C/H El Punto	234700	279500	27	18	20,0
11	11-47	Prest. 1A Presa Guamá	219900	293900	22	21	20,6
12	11-189	Prest. IB C/H Guamá	220800	293450	25	19	21,0
13	11-215	Prest. arcilloso derivadora Guamá	224280	286400	23	21	20,0
14	11-85	Prest. 3 Presa Río Sequito	218200	288800	33	19	20,8
15	11-62	Prest. 4 Presa Guamá	216150	294800	22	19	20,0
16	11-225	Prest. C C/H El Jíbaro	224330	299610	17	17	18,6
17	11-229	Prest. D C/H El Jíbaro	225830	299425	23	22	19,4
18	11-35	Materiales de relleno Patio de chatarra	222280	287530	47	10	20,4
19	11-230	Prest. D C/H El Jíbaro	226505	299100	23	21	19,2
20	11-90	Prest. 5 Río Sequito	216650	287100	61	29	21,3

La información en los archivos es insuficiente para la selección de σ_v y K . Se procedió de la siguiente forma:

El valor de (K) se tomó para los valores (1-2)

El valor de $\sigma_v = \gamma * h$: kPa.

γ : Peso específico KN/m³ y h : altura del talud m .

Tabla 2. Comportamiento de (K) con la profundidad (Hoek & Brown, 1980)

Profundidad (m)	58-500		500-1000		1000-2806	
	σ_v	K	σ_v	K	σ_v	K
Australia	13,05	2,03	20,30	1,28	17,35	1,27
Canadá	11,50	1,40	19,35	1,47		
Estados Unidos	8,40	0,85	19,15	1,24	53,30	0,91
Sudáfrica	10,15	1,24	13,90	0,99	48,45	0,68
Escandinava	9,35	2,33	13,80	1,62		
Otras regiones	8,65	1,62			48,60	1,00
Promedios	10,85	1,83	20,30	1,28	32,98	1,13
Prom Prof	500,00		1000,00		2000,00	

Este criterio se fundamenta, por el comportamiento de (K) (Figura 6) y el segundo por la ecuación básica del cálculo de taludes $\Sigma F = 0$ en la superficie de corte.

Para la aplicación del procedimiento se cumplimentó lo siguiente:

- 1) Utilizando (C, φ, σ_1) obtenidos en el laboratorio para cada préstamo, se obtuvieron los estados límites calculado (mínimo, medio y máximo) para los cuales $\sigma_3 \geq 0$.
- 2) Determinación de los parámetros del talud para los diferentes estados límites calculados (mínimo, medio y máximo), para los cuales $FS \geq 1$.
- 3) Determinación de los parámetros del talud para el aumento de la carga (por encima del estado límite máximo calculado) debido a la influencia del 20 % de la humedad en el macizo geológico $\eta_{agua} = 1,2$ y $\sigma_H = 0$.
- 4) Breve análisis de la influencia de la forma en presencia de σ_H y $\eta_{reológico} = 1,2$.
- 5) Cálculo de la ecuación pronóstico de $\beta^0_{límite} = f(C, \varphi, \sigma_1)$.
- 6) Los cálculos se realizaron con la ayuda del tabulador electrónico (Hoja de Cálculo 1).

Tabla 3. Hoja de Cálculo 1. Procedimiento para el cálculo de taludes

Recta Interceptos		ENSAYO DE CORTANTE DIRECTO			C kPa	φ	σ_1 kPa	γ kN/m ³	
$\tau' = y$	$\sigma = x$				40,00	14,00	200,00	20,50	
156,26	0,00	Datos de entrada correspondientes al Estado Límite ensayado en el laboratorio. Para chequear σ_1 el valor de σ_3 no puede ser negativo.							
0,00	200,00				$\eta_{debiliEstructural}$	$\eta_{reológico}$	$\eta_{aguas\ sub.}$	$\eta_{sísmico}$	
68,13	112,80				1,00	1,00	1,20	1,00	
Punto límite		Coeficientes de mayoración de la tensión total limite (σ_{total})							
Resultados del cálculo de las tensiones limites				Pasos para utilizar la hoja de cálculo					
Ecuación	c	m	σ_1	ζ_L	01-Leer detenidamente las notas aclaratorias				
envolvente	40,00	0,25	112,80	68,13	02-Introducir los datos del laboratorio (Estado tensional límite) y los coeficientes (mayores que la unidad--Estado tensional calculado)				
interceptos	156,26	0,78			03-Para el caso 2 y 3 se mueve (a) y (h) hasta obtener el equilibrio				
Caso # 1									
Solicitud		h	b	$\beta^0_{límite}$	Fr	Q_T	Q	Fs	k
Límite	132	6,43	10,64	31,13	5294	3859	6130	1,37	
calculada	158	7,71	12,77		7624	6669	12900	1,14	
Caso # 2 $\sigma_{horizontal} = 0$				α^0	Caso # 2 $\sigma_{horizontal} = 0$				
calculada	158	8,00	17,16	25,00	12990	703	1664	18,47	
Caso # 3 $\sigma_{horizontal} > 0$									
calculada	224	4,00	20,00	20,00	5141	4807	4952	1,07	1,00

Resultados

1) Utilizando (C, ϕ, σ_1) obtenidos en el laboratorio para cada préstamo se calcularon los estados límites (mínimo, medio y máximo) para los cuales $\sigma_3 \geq 0$.

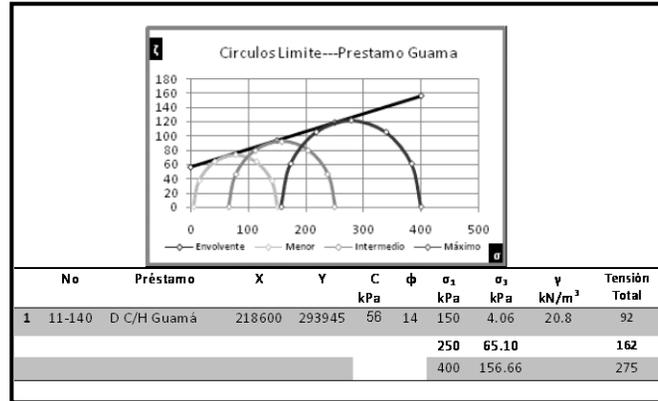


Figura 7. Estados límites calculados (mínimo, medio y máximo).

2) Determinación de los parámetros del talud para los diferentes estados límites calculados (mínimo, medio y máximo) para los cuales $FS \geq 1$.

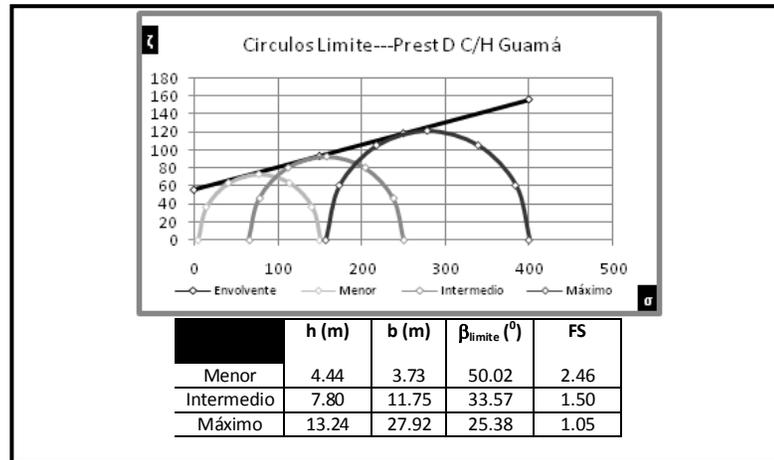


Figura 8. Parámetros del talud para los estados límites calculados (mínimo, medio y máximo).

3) Determinación de los parámetros del talud para el aumento de la carga (por encima del estado límite máximo calculado) debido a la influencia del 20% de la humedad en el macizo geológico $n_{agua} = 1,2$ y $\sigma_H = 0$.

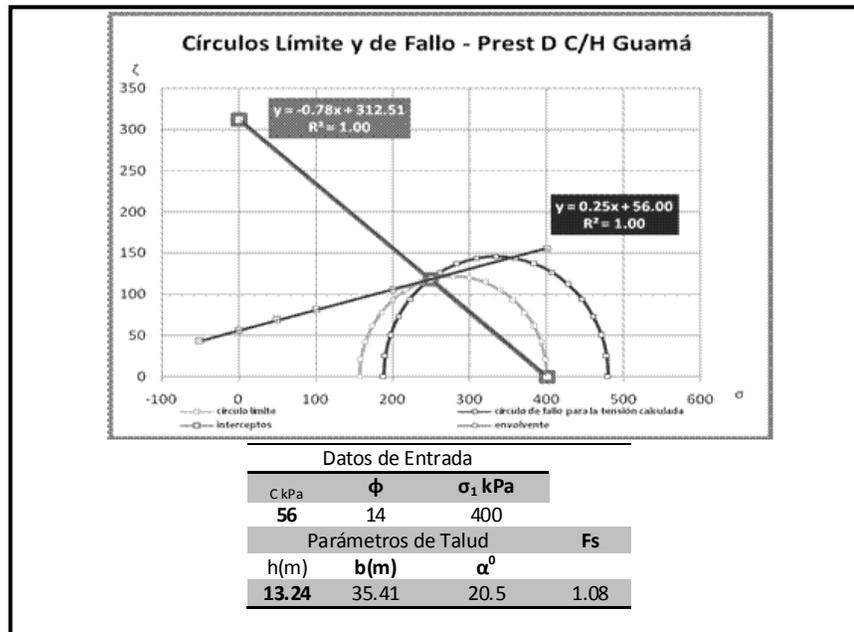


Figura 9. Parámetros del talud para una carga superior al límite.

4) Breve análisis de la influencia de la forma en presencia de σ_H y $n_{reológico} = 1,2$.

CkPa				$\phi,$	γ kN/m ³	Préstamo			
56				114.00	20.80	DC/Guamá			
σ_2 kPa	Solicitud	h	b	α°	Fr	Qr	Q	Fs	k
150	157	6,00	10,39	30,00	698,4	6713	6739	1,04	100
	200	6,00	10,39	30,00	698,4	6467	6739	1,08	150
	248	6,00	10,39	30,00	698,4	6182	6739	1,13	200
σ_2 kPa	Solicitud	h	b	α°	Fr	Qr	Q	Fs	k
250	275	6,00	10,39	30,00	698,4	6605	6739	1,06	100
	351	6,00	10,39	30,00	698,4	6739	6739	1,04	150
	435	6,00	10,39	30,00	698,4	6689	6739	1,04	200
σ_2 kPa	Solicitud	h	b	α°	Fr	Qr	Q	Fs	k
400	467	6,00	10,39	30,00	698,4	6348	6739	1,10	100
	596	6,00	10,39	30,00	698,4	6668	6739	1,05	150
	739	6,00	10,39	30,00	698,4	6738	6739	1,04	200

Figura 10. Estado tensional en presencia de tensiones horizontales k: (1-2) y $n_{reológico} = 1,2$.

5) Cálculo de la ecuación pronóstico de $\beta^0_{\text{límite}} = f(C, \varphi, \sigma_1)$.

Para realizar los cálculos se utilizó el Procedimiento de Pablov & Jlebnikov (1984).

$$\beta^0_{\text{límite}} = 21,38 + 0,5591 * C + 0,9055 * \varphi - 0,1038 * \sigma_1$$

r	σ_r	t	t_α
0,89	4,42	14,72	3,55

Discusión

Para la aplicación del procedimiento cumplimentamos lo siguiente:

1) Utilizando $f(C, \varphi, \text{ y } \sigma_1)$ obtenidos en el laboratorio para cada préstamo se calculan los estados límites (mínimo, medio y máximo), para los cuales el $\sigma_3 \geq 0$.

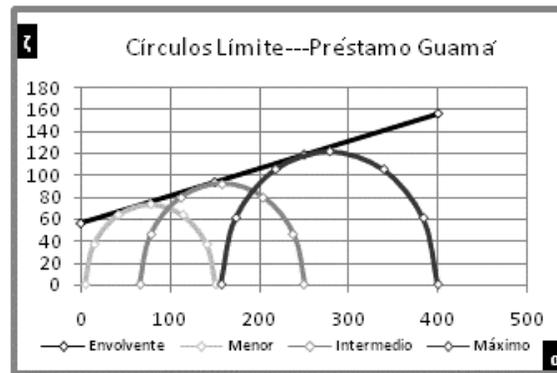


Figura 11. Estados límites (mínimo, medio y máximo).

Por razones económicas en el laboratorio se ensayan las combinaciones mínimas para obtener la envolvente. Mediante los cálculos se pudo realizar las combinaciones necesarias de σ_1 y σ_3 que permitan obtener los valores mínimo y máximo a que se puede someter el material ensayado. El valor de C y φ establecen la zona de equilibrio plástico.

2) Determinación de los parámetros del talud para los diferentes estados límites.

Tabla 5. Parámetros calculados (mínimo, medio y máximo) con FS ≥ 1

	h (m)	b (m)	$\beta^0_{\text{límite}}$	FS
Menor	4,44	3,73	50,02	2,46
Intermedio	7,80	11,75	33,57	1,50
Máximo	13,24	27,92	25,38	1,05

Con los estados límites obtenidos se puede pronosticar la forma del talud estable utilizando como ángulo de corte el correspondiente al estado límite $\beta^0_{\text{límite}}$.

3) Determinación de los parámetros del talud para el aumento de la carga (por encima del estado límite máximo calculado) debido a la influencia del 20% de la humedad en el macizo geológico $n_{agua} = 1,2$ y $\sigma_H = 0$.

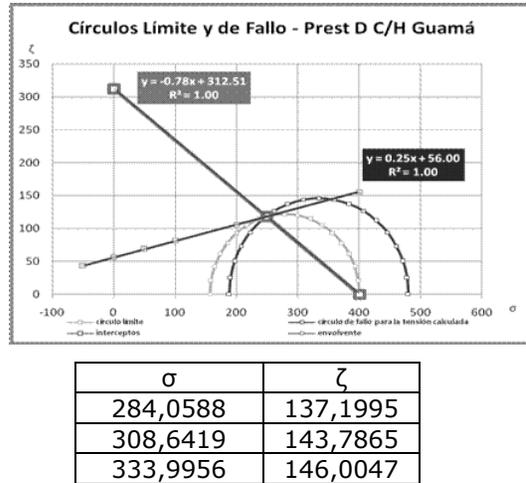


Figura 12. Estados tensional que están por encima de la envolvente.

Este caso tiene dos variantes:

1. Posibilidad de que la lluvia aumente el contenido de humedad del talud en un 20 % (se utiliza $n_{agua} = 1,2$).

En la Figura 12 se observa que por encima de la envolvente se encuentran solo tres combinaciones para las cuales el estado tensional es superior al límite lo que permite modificar el talud para obtener el equilibrio estático necesario.

Parámetros de talud			Fs
h(m)	b(m)	α^0	
13,24	35,41	20,5	1,08

2. Necesidad de extraer del préstamo una mayor cantidad de material.

En la Hoja de cálculo (tabla 6) se puede observar lo siguiente:

La solicitud límite es de 275 kPa y la calculada de 331 kPa, los parámetros del talud (h y b), el ángulo límite $\beta^0_{límite}$, la Fuerza que se oponen al movimiento F_r , la Motora Q_t la Masa de material Q y el Factor de seguridad F_s .

Tabla 6. Hoja de cálculo 2

Caso # 1									
Solicitud		h	b	$\beta^0_{\text{límite}}$	Fr	Q _T	Q	F _s	k
Límite	275	13,24	27,92	25,38	48321	46020	6130	1,05	
calculada	331	15,89	33,51		69583	79522	185558	0,88	
Caso # 2 $\sigma_{\text{horizontal}} = 0$ α^0									
calculada	331	13,24	35,41	20,50	74972	69497	198445	1,08	

Para la solicitud límite (275 kPa), la Masa de material Q = 61,30 ton, F_s = 1,05 y para la calculada (331 kPa), la Masa de material Q= 185,558 ton, F_s = 0,88 utilizando en ambos casos el ángulo límite ($\beta^0_{\text{límite}}$).

Utilizando el parámetro (h) límite, se modifica el ángulo de talud denominándose α^0 con lo cual se obtiene una Masa de Material Q =198,445 ton y un F_s = 1,08.

4) Breve análisis de la influencia de la Forma en presencia de σ_H y $\mu_{\text{reológico}} = 1,2$

En párrafos anteriores se ha planteado que el estado tensional natural está presente en todo momento. El Problema a resolver es el de pronosticar la forma del talud para que sea estable con diferentes combinaciones de $K = \frac{\sigma_{\text{horizontales}}}{\sigma_{\text{verticales}}} > 0 \rightarrow (1 - 2)$ durante un largo período de tiempo.

Tabla 7. Hoja de cálculo 3

Caso # 1									
Solicitud		h	b	$\beta^0_{\text{límite}}$	Fr	Q _T	Q	F _s	k
límite	275	13,24	27,92	25,38	48321	46020	6130	1,05	
calculada	331	15,89	33,51		69583	79522	185558	0,88	
Caso # 2 $\sigma_{\text{horizontal}} = 0$ α^0 Caso # 2 $\sigma_{\text{horizontal}} = 0$									
calculada	331	13,24	35,41	20,50	74972	69497	198445	1,08	
Caso # 3 $\sigma_{\text{horizontal}} > 0$									
calculada	739	6,00	10,39	30,00	6984	6738	6739	1,04	2,00

La Tabla 7 corresponde con el Caso No. 3 del procedimiento. Se asume el valor de $\mu_{\text{reológico}}$ siendo evidente que está por encima del estado límite.

Tabla 8. Hoja de cálculo 4

σ_1 kPa	Solicitud	h	b	α^0	Fr	Q _T	Q	F _s	k
400	467	6,00	10,39	30,00	6984	6348	6739	1,10	1,00
	596	6,00	10,39	30,00	6984	6668	6739	1,05	1,50
	739	6,00	10,39	30,00	6984	6738	6739	1,04	2,00

Se observa en la Hoja de Cálculo los valores de (h y b), (F_r y Q) constantes para las diferentes combinaciones de (K) lo que inciden en la Solicitud.

Q_T y F_S cambian de valor, la fuerza motora, aumenta con (K) y el factor de seguridad disminuye.

La forma del talud $h = 6$ y $b = 10,39$ permanece constante para este macizo geológico. Para los restantes casos la forma del talud permanece constante y depende del macizo geológico.

5) Cálculo de la ecuación pronóstico de $\beta^0_{límite} = f(C, \varphi, \sigma_1)$

$$\beta^0_{límite} = 21,38 + 0,5591 * C + 0,9055 * \varphi - 0,1038 * \sigma_1$$

r	σ_r	t	t_g
0,89	4,42	14,72	3,55

El valor alto de la correlación σ_r así como el de la Prueba de Student (t) no significa que esta ecuación tiene un carácter general. Se conoce el carácter variable de las arcillas en su composición y la influencia de la humedad en las propiedades mecánicas de los suelos.

Su utilización es limitada y solo indica un pronóstico muy reservado. A continuación se muestra la tabla comparativa de los datos obtenidos para $\beta^0_{límite}$ y calculados $\beta^0_{calculados}$ mediante la ecuación.

Tabla 9. Comparación de los datos obtenidos para $\beta^0_{límite}$ y calculados $\beta^0_{calculados}$ mediante la ecuación

No.	$\beta^0_{límite}$	$\beta^0_{calculado}$	Dif
1	50,02	49,80	0,22
2	33,57	39,42	-5,85
3	25,38	23,85	1,53
4	46,79	44,08	2,71
5	35,92	38,89	-2,97
6	30,90	33,70	-2,80
7	49,61	47,28	2,33
8	33,37	36,91	-3,54
9	28,80	29,12	-0,32
10	37,77	36,56	1,21
11	16,52	21,00	-4,48
12	12,23	5,43	6,80
13	55,25	57,23	-1,98
14	40,00	41,66	-1,66
15	35,82	31,29	4,53
16	46,79	44,08	2,71
17	35,92	38,89	-2,97
18	30,90	33,70	-2,80
19	44,99	44,34	0,65
20	39,80	41,75	-1,95

No.	$\beta^0_{límite}$	$\beta^0_{calculado}$	Dif
31	49,75	44,91	4,84
32	37,72	40,24	-2,52
33	34,00	37,13	-3,13
34	51,83	44,78	7,05
35	37,10	39,59	-2,49
36	31,35	34,40	-3,05
37	51,27	45,47	5,80
38	37,79	40,28	-2,49
39	33,71	36,65	-2,94
40	51,45	46,66	4,79
41	39,21	41,47	-2,26
42	31,72	33,68	-1,96
43	47,28	43,10	4,18
44	35,38	38,43	-3,05
45	31,72	35,32	-3,60
46	50,07	41,09	8,98
47	36,02	37,98	-1,96
48	28,96	33,83	-4,87
49	52,50	46,38	6,12
50	39,77	41,71	-1,94

21	35,47	38,12	-2,65	51	35,80	38,59	-2,79
22	46,19	44,49	1,70	52	45,02	43,74	1,28
23	39,70	41,89	-2,19	53	25,15	30,77	-5,62
24	36,00	39,30	-3,30	54	18,86	15,20	3,66
25	48,03	42,06	5,97	55	51,27	45,47	5,80
26	38,77	39,47	-0,70	56	42,70	42,88	-0,18
27	27,93	31,69	-3,76	57	34,66	37,69	-3,03
28	53,63	44,99	8,64	58	56,82	58,39	-1,57
29	37,59	39,80	-2,21	59	45,98	45,42	0,56
30	31,32	34,61	-3,29	60	41,86	35,04	6,82

Conclusiones

El procedimiento seleccionado permite el cálculo del talud de explotación óptimo para todos los préstamos de materiales de construcción analizados para el municipio Pinar del Río, utilizando el tabulador electrónico.

Para cada préstamo se obtienen tres estados límites, para veinte se obtienen sesenta observaciones.

El rango de las variables

C : (17-64) kPa

φ (6-29) grados

σ_1 : (50-450) kPa

Referencias bibliográficas

MARTÍNEZ, R. 2009: Procedimiento para evaluar la Estabilidad del Macizo Geológico en Taludes de Suelos y Galerías en Minas 3ra. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. ISBN: 978-959-7139-83-6.

E. HOEK & BROWN, E. 1980: Underground Excavations in Rock The institution of Mining and Metallurgy, London.

PABLOV, C. & JLEBNIKOV, A.1983: Matematicheskaia Statistika Marcheidiarskon dele. Instituto de Minas de San Petersburgo.

* Trabajo tutorado por el Dr. Rafael Martínez Silva.