



CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo original de investigación

Procedimiento para calcular el criterio de fallo del macizo geológico utilizando la teoría de Mohr

Rafael Martínez Silva ^{1,2*} <https://orcid.org/0000-0001-6466-6571>

¹ Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca. Pinar del Río, Cuba

² Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia: martinez@upr.edu.cu

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Introducción: De los criterios de rotura basados en la teoría de Mohr los más usados son el de Coulomb y el de Hoek & Brown, ambos dan soluciones aproximadas para la envolvente límite y no analizan su aplicación a las condiciones donde se ejecuta la obra. **Objetivo:** Obtener un procedimiento basado en la teoría de Mohr que permita pronosticar la capacidad portante del macizo geológico en las condiciones de campo. **Métodos:** En el trabajo se aplica el método empírico de investigación científica. Mediante ensayos simples de laboratorio del material intacto, se obtienen los parámetros del estado tensional límite. **Resultados:** Con un número mínimo de ensayos (5 en total) se obtiene la envolvente límite de Mohr con mayor precisión para pronosticar el criterio de fallo. El procedimiento se auxilia del tabulador electrónico para realizar los cálculos. **Conclusiones:** El procedimiento presentado permite pronosticar la capacidad portante del macizo geológico donde se ejecuta la obra.

Palabras clave: Mohr; macizo geológico; envolvente límite; estados límites; criterio de fallo

Procedure for calculating the failure criterion of the geological massif using Mohr's theory

ABSTRACT

Introduction: Among the failure criteria based on Mohr's theory, the most commonly used ones are the Coulomb and the Hoek & Brown. Both criteria provide approximate solutions for the limit envelope and do not analyze their applicability to the specific conditions under which a construction project is executed. **Objectives:** To develop a procedure based on Mohr's theory that allows the prediction of the bearing capacity of the geological massif under field conditions. **Methods:** In this study, it is applied an empirical method of scientific investigation. By conducting simple laboratory tests on intact material, they are determined the parameters related to the limit stress state. **Results:** With a minimal number of tests (a total of five), it is obtained the Mohr's limit envelope with greater precision, enabling the prediction

of failure criteria. The procedure is complemented by electronic tabulation for performing calculations. **Conclusions:** The procedure presented facilitates the prediction of the bearing capacity of the geological massif where the construction is carried out.

Keywords: Mohr; geological massif; limit envelope; limit states; failure criterion

INTRODUCCIÓN

La resistencia del macizo geológico se analiza utilizando la teoría de Mohr. Esta es eminentemente práctica y la forma de la envolvente se ha asociado con una curva determinada lo que no representa su veracidad. ^(1,2) De los criterios de rotura basados en la teoría de Mohr los más usados son el de Coulomb y el de Hoek & Brown. ^(3,4) En el primero la envolvente la simplifica en una recta y el segundo en una curva (utilizando ensayos triaxiales) que según sus palabras: nos hemos basado en nuestra experiencia, tanto teórica como práctica, del comportamiento de la roca, para desarrollar por medio de un proceso de aproximaciones, una relación empírica entre los esfuerzos principales que intervienen en el fenómeno del debilitamiento de la roca. En ambos casos se utilizan curvas que no responden directamente a los datos reales del laboratorio ni a la curva real que se obtiene del ensayo de rotura.

El problema a resolver radica en la utilización de los ensayos de laboratorio para determinar el estado tensional límite que provoca el fallo del macizo geológico. La hipótesis: cada punto de la curva que se obtiene representa un estado límite, por tanto, la tensión total límite del macizo geológico debe ser superior a la solicitada en la obra.

Trasladar las condiciones de laboratorio al lugar donde se ejecuta la obra se convierte en el objetivo y para ello es necesario obtener un procedimiento que permita pronosticar la capacidad portante del macizo geológico en las condiciones de campo. El objeto lo constituyen los parámetros del estado tensional límite del material intacto ensayado y el objetivo fue obtener un procedimiento que permita pronosticar la capacidad portante del macizo geológico en las condiciones de campo.

MÉTODOS

Se utilizó el método empírico. La Universidad de Pinar del Río y la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas trabajan en investigaciones geológicas para las obras que se ejecutan en el territorio. Los resultados forman parte del archivo técnico de la empresa y recientemente en un proyecto de investigación para el Instituto de Geología y Paleontología de Cuba. ⁽⁵⁾

Se realizaron ensayos de rotura en probetas de hormigón, suelos y rocas, estos son simples y biaxiales. Se plotearon los valores en un sistema de ejes $(\tau - \sigma)$ y se obtuvieron, siguiendo el criterio de falla de Coulomb, la recta límite para ese material. En el trabajo que se propone se obtienen los estados tensionales principales representados por los círculos de rotura tangentes a la curva límite en los puntos límites obteniéndose la envolvente de Mohr a los grandes círculos y el criterio de fallo $(\tau - \sigma)$. La envolvente caracteriza a cada material ensayado en las condiciones de laboratorio y para el pronóstico define lo siguiente: los estados tensionales sobre la envolvente son límites, por debajo son seguros y por encima son de fallos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la solución del problema se utilizan probetas de las llamadas "roca intacta" en las que no se analizan las condiciones del medio externo y los defectos de estas. Se realizaron los ensayos de: a) tracción (Brasiliano) y Compresión, b) cortante directo en suelos c) celda triaxial (modelación)

Ensayos simples de tracción compresión

Como su nombre lo indica estos ensayos determinan las posibilidades del material a tracción o compresión. Los valores de resistencia del material se tomaron como tensiones principales $\sigma_c = \sigma_1$ y $\sigma_T = \sigma_3$. Por definición siguiendo el criterio de fallo de Mohr, este ocurre mediante el estado tensional complejo donde actúan las tensiones $(\tau \sigma)$. Las fórmulas para obtener los parámetros del estado tensional límite, el vector tensión total límite (ρ) y el ángulo (A) que permite ubicar la posición de la sección ($2\alpha = 180 - A$) son las siguientes (1,2,3,4,5):

$$\rho = \sqrt{\sigma_L^2 + \tau_L^2} \quad (1)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{\tau_L}{\rho} \quad (2)$$

$$2\alpha = 90 + \varphi \quad (3)$$

$$G = r_C + r_T \quad (4)$$

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{r_C - r_T}{G} \right) \quad (5)^* \text{ ver gráfico auxiliar en la figura 1}$$

Utilizando como dato de entrada de los ensayos en el laboratorio los valores de $(\sigma_C \text{ y } \sigma_T)$ tenemos:

En el círculo de compresión el estado límite se determina $(\sigma_L = r_C - r_C \cos A \quad \tau_L = r_C \operatorname{sen} A)$

En el círculo de tracción el estado límite se determina $(\sigma_L = r_T + r_T \cos A \quad \tau_L = r_T \operatorname{sen} A)$

La aplicación del procedimiento se realiza en la UIC Pinar del Río y se elaboró una instrucción para determinar la capacidad portante del hormigón simple (ver figura 1 al final).⁽⁶⁾

$$2 \alpha = 90 + \varphi \quad (8)$$

$$cc = \text{centro del círculo} = \sqrt{\text{radio}^2 + \text{tensión total}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \text{centro del círculo} - \text{radio del círculo} \quad (10)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \text{diámetro del círculo} \quad (11)$$

En el ensayo de suelos, con una misma matriz, a medida que aumenta la componente vertical aumenta (τ) debido a que la probeta se consolida y se obtienen los estados tensionales correspondientes. En rocas es necesario realizar los ensayos con matrices de diferentes ángulos para obtener diferentes estados tensionales $(\tau_\alpha - \sigma_\alpha)$.

Utilizando los datos del laboratorio y el estado tensional calculado se puede plotear la envolvente y los círculos correspondientes a cada estado tensional (ver figura 2 al final). Observe los valores de los puntos límites señalados sobre la envolvente y los estados tensionales $(\sigma_1 - \sigma_2)$ para confirmar la exactitud de los cálculos.

La línea de tendencia tiene la ecuación $(y = -0,0037x^2 + 0,6664 + 7,8819 \text{ y } R^2 = 0,9998)$ derivando la ecuación se obtiene $(\varphi = 2 * 0,0037x + 0,6665 - \text{Rad})$

Cortante con matrices

Este tipo de ensayo tiene la característica de que la probeta se encuentra confinada en la matriz. Para suelos el ensayo se realiza mediante una carga vertical y otra horizontal, la matriz esta seccionada horizontalmente para que se produzca la rotura en esa dirección y se le denomina cortante directo.

En rocas, la matriz tiene un ángulo determinado y la carga se aplica verticalmente la cual se descompone en sus componentes, (Q-N) y se le denomina cortante indirecto. En ambos casos se obtienen $(\tau_\alpha - \sigma_\alpha)$ que responden a un estado tensional bidimensional $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

Las fórmulas de cálculo son las siguientes (6,7,8,9,10,11):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\tau_\alpha}{\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha} = \text{diámetro} = 2r \quad (6)$$

$$\rho = \text{tensión total} = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \tau_\alpha^2} \quad (7)$$

Ensayos triaxiales

Para la ejecución de este tipo de ensayo se utilizan celdas triaxiales, tanto para rocas como suelos. La celda permite aplicar sucesivos estados tensionales hasta conseguir la rotura a diferentes probetas y en este caso simularemos la celda utilizando los valores obtenidos de los estados tensionales principales en el epígrafe anterior

Las fórmulas de cálculo son las siguientes: (12,13,14,15,16,17,18)

$$G = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_3}{2} \quad (12)$$

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{G} \right) \quad (13)$$

$$\sigma_L = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1}{2} \cos A \quad (14)$$

$$\tau_L = \frac{\sigma_1}{2} \operatorname{sen} A \quad (15)$$

$$\varphi = \frac{\tau_L}{\frac{\sigma_1}{2}} \quad (16)$$

$$\rho = \sqrt{\sigma_L^2 + \tau_L^2} \quad (17)$$

$$2\alpha = 90 + \varphi y 2\alpha + A = 180 \quad (18)$$

Para chequear el cálculo se plotó las envolventes de la forma siguiente: directa (a la que proviene de los puntos límites obtenidos del ensayo con matrices) e inversa (a la que se obtiene mediante los puntos límites calculados a partir de la simulación en la celda triaxial del estado tensional principal obtenido mediante las matrices). Observe la coincidencia casi total entre ambas envolventes (ver figura 3 al final).

Condición de fallo del macizo geológico

Una excavación en el macizo geológico altera el campo

natural de tensiones e induce un nuevo campo que puede sobrepasar su capacidad portante y hacerlo colapsar o trabajar con una carga superior a la natural. En dichas condiciones el macizo como tal sufre alteraciones que influyen en las propiedades mecánicas del mismo. En una excavación el material fundamental con que se construye lo representa el macizo en que se ejecuta la obra. El grado de conocimiento que se tiene sobre el entorno de la obra antes de su construcción y después de ejecutada la misma garantiza su explotación.

El problema a resolver es el relacionado con los resultados de los ensayos de la roca intacta y el macizo geológico, lo que se identificó con el nombre de factor de escala. La solución que tomamos se fundamenta en la suposición de que el macizo geológico en su conjunto es menos resistente que cualquiera de los elementos que lo forman. Le hemos llamado coeficientes de minoración a un grupo mínimo que nos permite pronosticar la capacidad portante del macizo geológico (19,20,21).

$$[\sigma_{\text{macizogeológico}} = (\eta_e \times \eta_{\text{agua}} \times \eta_{\text{reológico}} \times \eta_{\text{sismico}}) \times \sigma_{\text{intacta}}] \quad (19)$$

$$\eta_{\text{agua}} = \frac{\sigma_{\text{saturado}}}{\sigma_{\text{seco}}} \quad (20)$$

$$\eta_{\text{reológico}} = \frac{\sigma_{\text{paraun tiempo} \rightarrow \text{infinito}}}{\sigma_{\text{paraun tiempo} \rightarrow 0}} \quad (21)$$

- Para rocas de comportamiento frágil al destruirse: 0,9-1,0
- Para rocas que experimentan deformaciones plásticas antes de destruirse: 0,6-0,8

$\eta_{\text{sismico}} \rightarrow$ depende de las Normas de cada Región

Se introduce el termino de Condiciones externas = datos X coeficientes de minoración = macizo geológico (ver figura 4 al final)

Parámetros principales por cada tipo de ensayo

Como ejemplo de la utilización del tabulador electrónico se dan los resultados en la tabla 1 para los ensayos que se ejecutan en el laboratorio. DOI: 10.5281/zenodo.10895517

Conclusiones

El procedimiento presentado permite pronosticar la capacidad portante del macizo geológico donde se ejecuta la obra.

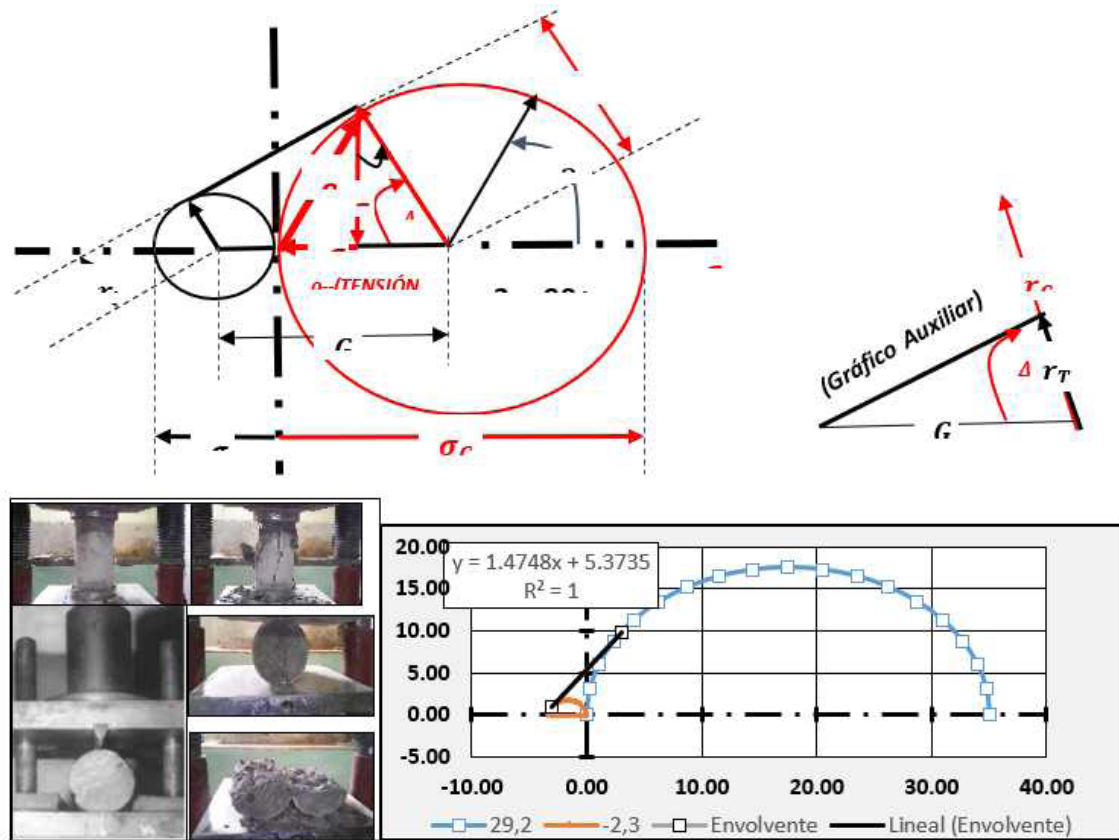


Fig. 1. Esquema de cálculo del estado límite y envolvente de Mohr a partir de ensayos simples de compresión y tracción indirecta (Brasiliano)

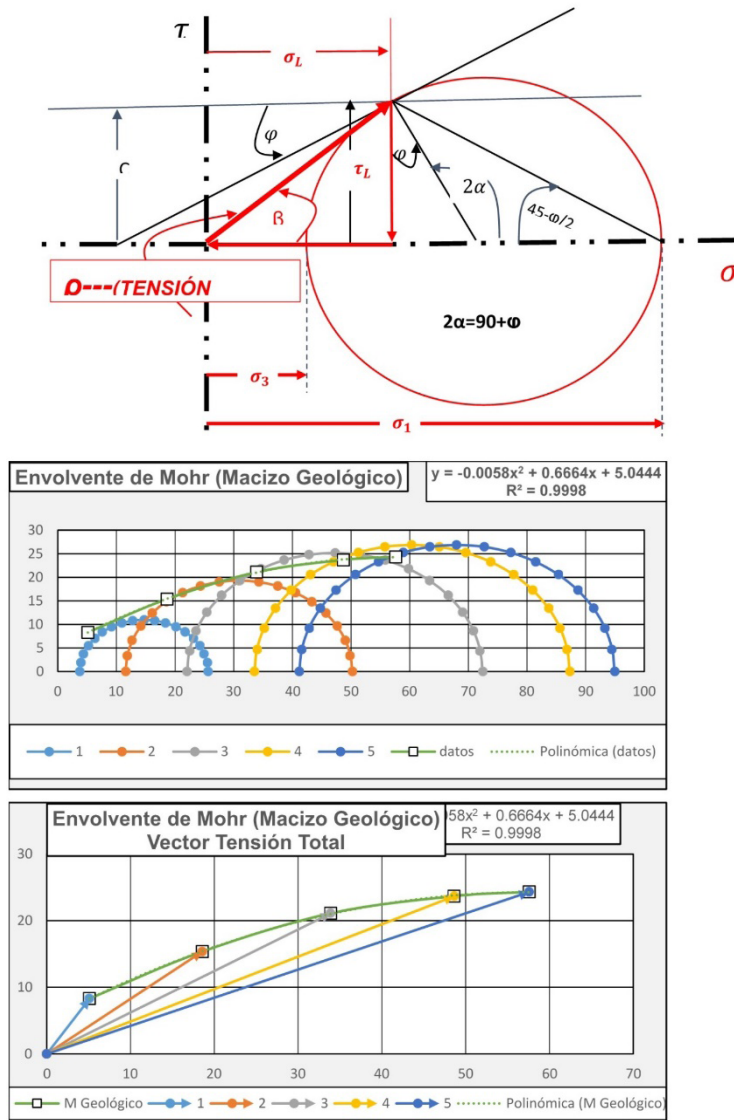


Fig. 2. Esquema de cálculo del estado límite, envolvente de Mohr y el vector tensión total (ρ) para cada estado tensional

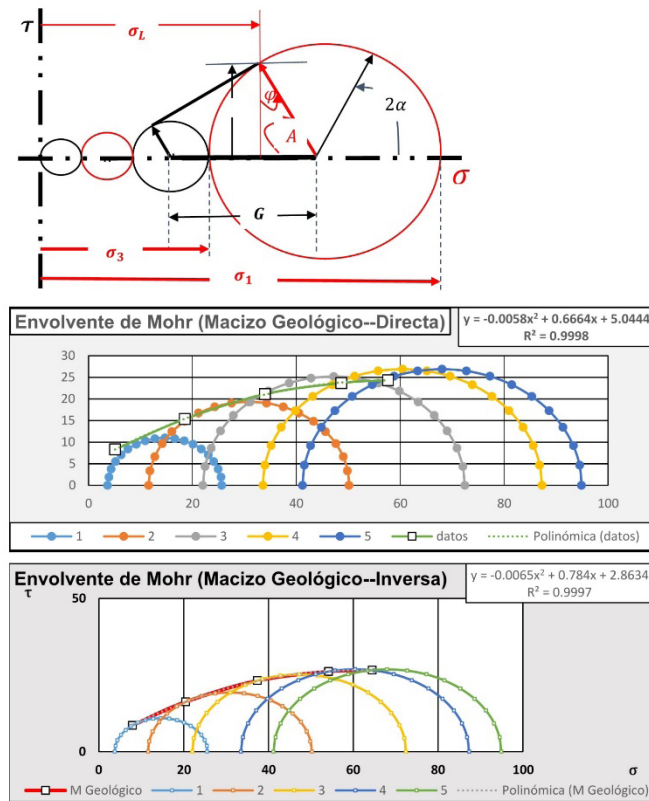


Fig. 3. Esquema de cálculo del estado límite, envolvente triaxial y verificación gráfica del cálculo del ensayo triaxial (superior-envolvente directa e inversa inferior)

Tabla 1. Evaluación de la capacidad portante del macizo geológico

Clave de desprotección Mohr-tracción compresión										
Capacidad portante del macizo geológico para diferentes condiciones externas										
	$\sigma_{L=x}$	$\tau_{L=y}$	ρ	ángulo (β)	Grados φ	Rad φ	C_{Macizo}	σ_{Macizo}	f_{kp}	
Compresión	3,02	9,82	10,27	72,93	55,86	0,97	5,37	35,00	3,50	
Tracción	-3,02	0,93	3,15	17,07	55,86	0,97	5,37	-3,30	0,33	
Clave de desprotección Mohr-cortante con matrices										
Capacidad portante del macizo geológico para diferentes condiciones externas										
Celdas para plotear										
No	$\sigma_{L=x}$	$\tau_{L=y}$	σ_1	σ_2	ρ	ángulo (β)	ángulo 2α	ϕ	rad φ	C
1	5	8	26	4	10	58	65	34,64	0,60	4,77
2	19	15	50	12	24	40	64	25,71	0,45	6,48
3	34	21	72	22	40	32	61	15,50	0,27	11,57
4	49	24	87	34	54	26	59	5,72	0,10	18,87
5	58	24	95	41	63	23	58	0,24	0,00	24,43
Clave de desprotección Mohr-celda triaxial										
Capacidad portante del macizo geológico para diferentes condiciones externas										
Celdas para plotear										
$\sigma_{L=x}$	$\tau_{L=y}$	ρ	ángulo (β)	Grados φ	Rad ϕ	C = y-mx	Grados 2α			
8	9	12	47	38	0,67	2	128			
20	16	26	38	33	0,57	3	123			
37	23	44	32	23	0,40	7	113			
54	26	60	26	13	0,23	13	103			
65	27	70	22	8	0,13	18	98			

Datos de laboratorio (roca intacta)		Condiciones externas = datos X		FS		2,00	
		Coeficiente minoración = macizo geológico					
$\sigma_{\alpha-x}$	$\tau_{\alpha-y}$	carga externa = macizo geológico/FS					
		No		$\tau_{\alpha-y}$			
		$\sigma_{\alpha-x}$					
8	13	1	5	8	3		4
29	24	2	19	15	9		8
53	33	3	34	21	17		11
76	37	4	49	24	24		12
90	38	5	58	24	29		12

Coeficientes de minoración de la roca intacta			
$\eta_{debilEstructural}$	$\eta_{reológico}$	$\eta_{aguas\ sub.}$	$\eta_{sísmico}$
0,80	1,00	0,80	1,00

Vector tensión total (TT macizo geológico)				$\beta=acot(\tau_x/\sigma_x)$	ángulo (β)	ρ_{macizo}
1	0	5	x	1,02	58,39	10
	0	8	y			
2	0	19	x	0,69	39,61	24
	0	15	y			
3	0	34	x	0,56	31,91	40
	0	21	y			
4	0	49	x	0,45	25,96	54
	0	24	y			
5	0	58	x	0,40	22,89	63
	0	24	y			

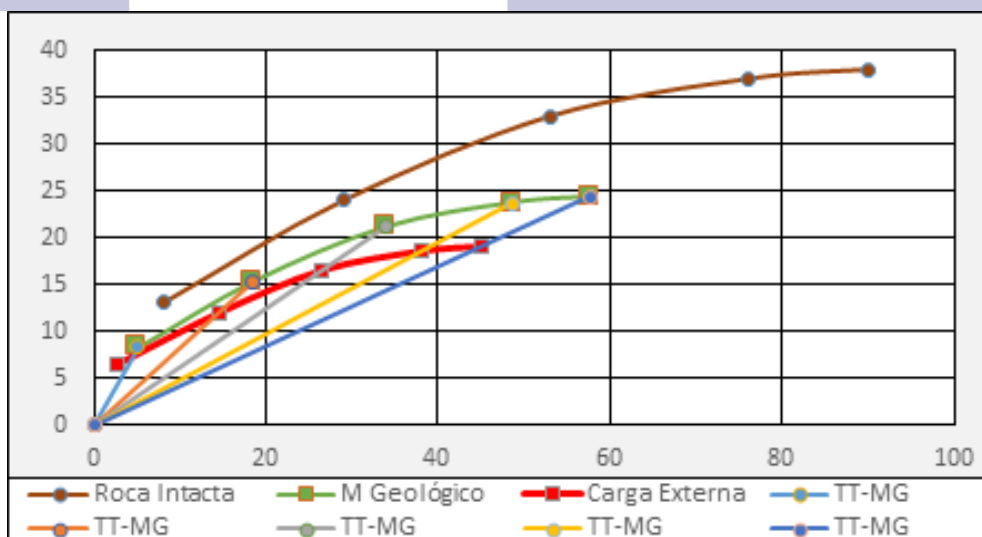


Fig.4. Condición de fallo del macizo geológico

Leyenda: $\sigma_L - \tau_L \rightarrow$ puntos límites $\rho - \beta \rightarrow$ tensión total y ángulo de equilibrio
 $C - \varphi \rightarrow$ cohesión y ángulo de fricción interna $2\alpha \rightarrow$ ángulo de chequeo
 $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 \rightarrow$ estados tensionales principales
 $f_{kp} \rightarrow$ coeficiente de protodiakon

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rupineit KB, Liberman YI. Bbidenie Mejaniku Gornig Parod. Moscú: 1960.
2. Martínez Silva R. Geomecánica 1ra Parte (Conceptos Básicos y Mecánica de Rocas) Red Universitaria <http://catalogo.reduniv.edu.cu> CUBA ISBN 978-959-16-0631-1) [Internet]. 2007 [24 feb 2024]. Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/>
3. González de Vallejo. Ingeniería Geológica. Madrid, España: 2004.
4. Hoek E & Brown ET. Underground Excavations in Rock. Instituto de Minas y Metalurgia de Londres: 1980.
5. Martínez Silva R, Ramírez González GL, García Gutiérrez JA, Díaz Deulofeo AR, Suárez Sánchez O, González Brito W. Caracterización Ingeniero Geológica del Municipio de Pinar del Río [Internet]. Pinar del Río Cuba: Univesidad de P del Río, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba; 2022 [24-02-2024]. Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/3890>
6. Martínez Silva Rafael, Vilau Urquiaga L. Determinación de la Capacidad Portante del Hormigón Simple utilizando la Teoría de Mohr [Internet]. Pinar del Río: Universidad de Pinar del Río, Unidad de investigaciones para la construcción (ENIA); 2016 [15-03-2024]. Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/>

Recibido: 29/03/2024

Aprobado: 19/09/2024

Conflictos de intereses

El autor declara que no existe conflictos de intereses, ni con la investigación presentada, ni con la institución que representa.

Financiamientos

No se utilizó financiamiento específico para realizar la investigación presentada.

Cómo citar este artículo

Martínez Silva R. Procedimiento para calcular el criterio de fallo del macizo geológico utilizando la teoría de Mohr. An Acad Cienc Cuba [internet] 2024 [citado en día, mes y año];14(3):e1555. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1555>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2024.

