

Universidad de Pinar del Río

Hnos. Saiz Montes de Oca

Facultad de Ciencias Técnicas—Dpto. de Geología

La Teoría de Mohr en la Geomecánica

Autor: Rafael Martinez Silva

2021

Contenido

Contenido	2
Figuras	2
Tablas	3
Título: Teoría de Mohr	4
Introducción	4
Estado tensional simple	4
Estado tensional complejo	5
Círculo de Mohr para el estado tensional complejo	6
1 Métodos	7
2 Resultados y discusión	8
2.1 Ensayos simples de tracción compresión.....	8
2.2 Cortante con matrices	9
2.3 Ensayos triaxiales	11
3 Aplicación a la evaluación mecánica del macizo geológico	13
3.1 Concepto de macizo geológico.....	14
3.2 Capacidad portante del macizo geológico	16
3.3 Ensayos mecánicos mínimos necesarios para este procedimiento.	16
3.3.1 Las rocas	16
3.3.2 Las semirocas	17
3.3.3 Los suelos coherentes	17
3.4 Determinación de la capacidad portante del macizo geológico	18
3.4.1 Coeficientes de cálculo.....	18
3.4.2 Condiciones externas	18
3.4.3 Coeficiente del Estado Tensional Natural	19
3.4.4 Determinación de la condición de “fallo”	19
3.5 Utilización del tabulador electrónico en el cálculo	20
3.5.1 Ensayo de tracción—compresión.....	20
3.5.2 Cortante con matrices.....	21
3.5.3 Celda triaxial	23
4 Novedad científica.....	24
5 Bibliografía	25

Figuras

Figura 1 Compresión en la parte superior y tracción indirecta en la parte inferior (método Brasileiro).....	4
Figura 2 Estado tensional simple.....	5
Figura 3 Estado tensional complejo	5

Figura 4 Posición de un plano (N—Q) en el espacio	5
Figura 5 Esquema de Mohr para la representación del estado tensional complejo (La figura 43 tomada del Timoshenko1935)	6
Figura 6 Círculo de Mohr y ecuaciones para diferentes estados tensionales.....	6
Figura 7 Concepto de Envolvente de Mohr.....	7
Figura 8 Esquema y fórmulas de cálculo	8
Figura 9 Envolvente de Mohr a partir de ensayos simples de compresión y tracción indirecta (Brasiliano)	8
Figura 10 Análisis de las propiedades mecánicas del hormigón simple a los 7 y 28 días	9
Figura 11 Características del ensayo	9
Figura 12 Esquema y fórmulas de cálculo	9
Figura 13 Envolvente de Mohr	10
Figura 14 Vector tensión total para cada estado tensional	11
Figura 15 Envolvente de Mohr a partir de celdas triaxiales.....	11
Figura 16 Esquema y fórmulas de cálculo	12
Figura 17 Verificación gráfica del cálculo del ensayo triaxial.....	13
Figura 18 Envolvente de Mohr correspondiente al ensayo triaxial	13
Figura 19 Mapas geológico y estructuro-facial con las formaciones geológicas.	14
Figura 20 Perfil desde Isla de Pinos hasta Pinar del Río.	14
Figura 21 Mapas tectónico (izquierda) y sísmico (derecha).....	14
Figura 22 Mapa hidrogeológico (izquierda) y esquema de una obra subterránea (derecha). ...	15
Figura 23 Perfil de una excavación en la ciudad de Pinar del Río.	15
Figura 24 El macizo geológico en la Geomecánica.....	16
Figura 25 Ensayos de compresión directa (izquierda) y tracción indirecta (Brasiliano)	16
Figura 26 Ensayos de muestra semiregular (corte y fragmentación, izquierda) muestra irregular (derecha)	17
Figura 27 Prensa de ensayo a compresión simple para suelos	17
Figura 28 Ensayo de cortante directo en suelos	17
Figura 29 Coeficiente de debilitamiento estructural	18
Figura 30 Determinación del Coeficiente de Estado Tensional y la Tensión Total Calculada	19
Figura 31 Vector tensión total del macizo geológico y la carga externa.....	20
Figura 32 Tracción—compresión para el macizo geológico.....	21
Figura 33 Cortante con matrices para el macizo geológico	22
Figura 34 Celda triaxial para el macizo geológico	23

Tablas

Tabla 1 Datos de laboratorio y estado tensional calculado para cada ensayo	10
Tabla 2 Parámetros de la envolvente.....	10
Tabla 3 Vector tensión total	11
Tabla 4 Resultados finales	11
Tabla 5 Estados tensionales principales obtenidos del epígrafe anterior mediante el ensayo con matrices.....	12
Tabla 6 Puntos límites en el cortante con matrices (envolvente directa) y mediante la simulación del ensayo triaxial (envolvente inversa)	12
Tabla 7 Resultados finales y estados tensionales correspondientes	13
Tabla 9 Concepto de condiciones externas.....	19

Título: Teoría de Mohr

Introducción

La resistencia del macizo geológico se ha tratado de analizar fundamentalmente 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]}. El **problema** a resolver radica en la utilización de los ensayos de laboratorio para determinar la tensión y el ángulo total límite del estado tensional que provoca el fallo del macizo geológico. La **hipótesis** se enuncia de la forma siguiente: cada punto de la envolvente representa un estado límite, por tanto, la tensión total límite del material ensayado debe ser superior a la solicitada. El **objeto** lo constituyen los parámetros del estado tensional límite del material ensayado.

La solución del problema implica para cada tipo de ensayo determinar lo siguiente:

- 1) Los parámetros del estado tensional límite del material de trabajo mediante ensayos simples de laboratorio.
- 2) Pronosticar el criterio de fallo utilizando la tensión y el ángulo total límite del material ensayado.

Como medio para el cálculo se utiliza el tabulador electrónico.

Es necesario recordar que el análisis en la Resistencia de Materiales se realiza sobre la sección del elemento estructural. Figura 1

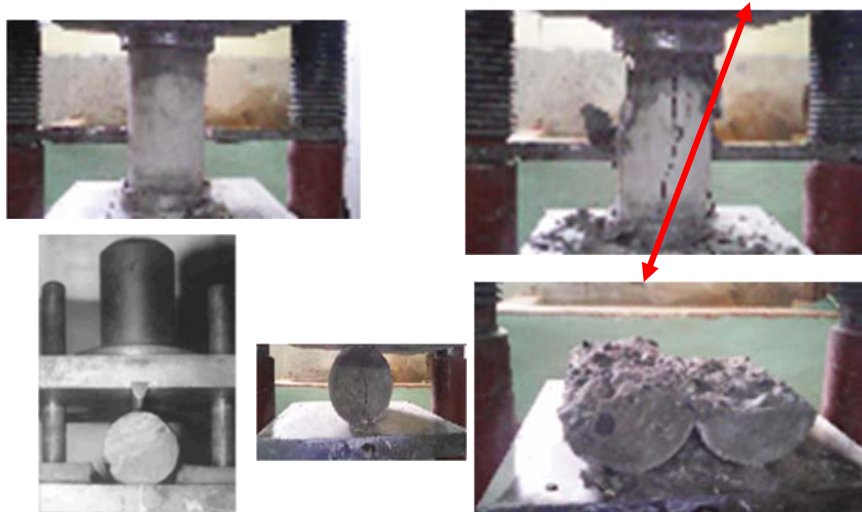


Figura 1 Compresión en la parte superior y tracción indirecta en la parte inferior (método Brasileiro)

La probeta de hormigón (parte superior) sometida a compresión, falla siguiendo la línea representada a la derecha.

Mediante el método Brasileiro se separa en dos partes a través de una sección longitudinal (parte inferior)

Estado tensional simple

Como medio didáctico se tiene una pieza que cuelga y en la cual internamente se aplica una carga de 8t y externamente otra de 5t Figura 2 (izquierda)

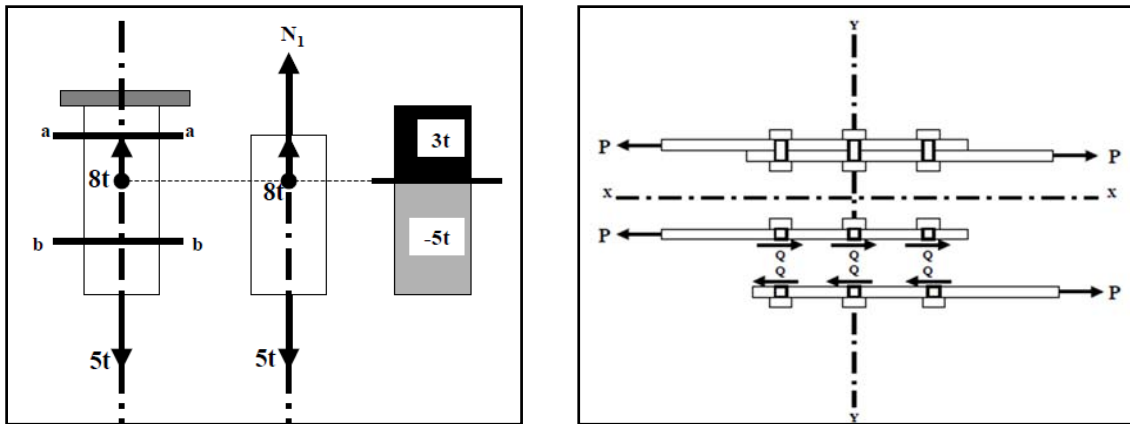


Figura 2 Estado tensional simple

Se analiza el equilibrio mediante $\sum F = 0$ y se obtiene que la sección (a—a) está sometida a compresión y la (b—b) a tracción (en el texto la compresión es positiva y la tracción negativa). A la derecha en la junta remachada se obtiene al separar las planchas, cortante. De forma tal se ha representado la acción del estado tensional simple en la sección mediante fuerzas perpendiculares (normales) y paralelas (cortante).

Las fuerzas interiores son perpendiculares y paralelas a la sección que se estudia.

Estado tensional complejo

Un sistema de fuerzas puede transformarse en su resultante (Figura 3 extremo izquierdo) la cual actuando en la sección provoca normales \underline{N} y cortantes \underline{Q}

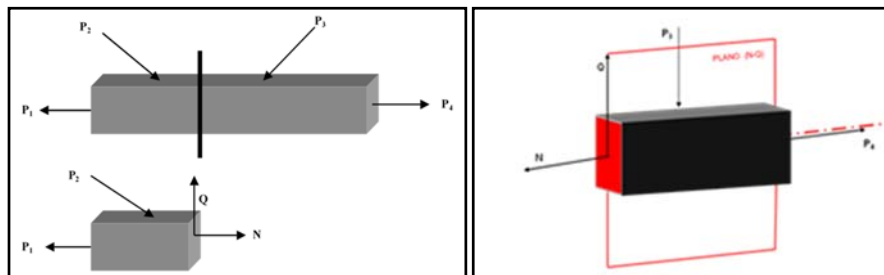


Figura 3 Estado tensional complejo

Estas fuerzas internas (utilizando el concepto de tensión) en la sección provocan las tensiones normales (σ) y las cortantes (τ) en un plano longitudinal que se denomina (τ — σ) (Figura 3 extremo derecho)

Puede decirse que la coincidencia de la sección analizada con los ejes principales es la excepción y lo que ocurre generalmente es que la sección forma un ángulo con los planos principales El plano (τ — σ) forma el ángulo (α) Figura 4

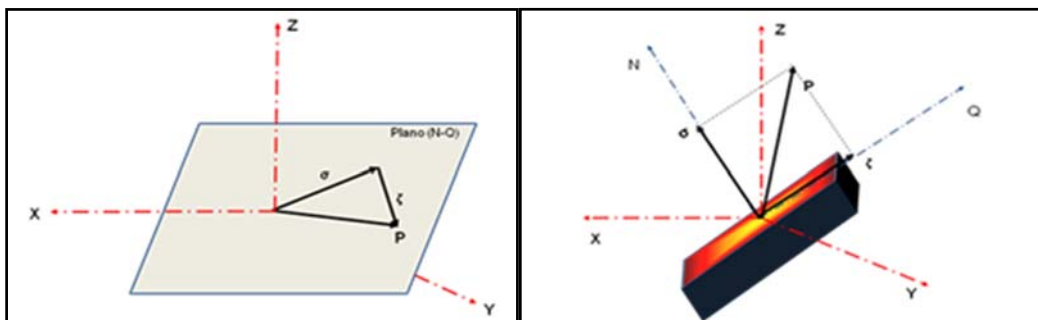


Figura 4 Posición de un plano (N—Q) en el espacio

Círculo de Mohr para el estado tensional complejo

En epígrafes anteriores se establece que el estado tensional simple ocurre en casos particulares y que la generalidad lo constituye el estado tensional complejo.

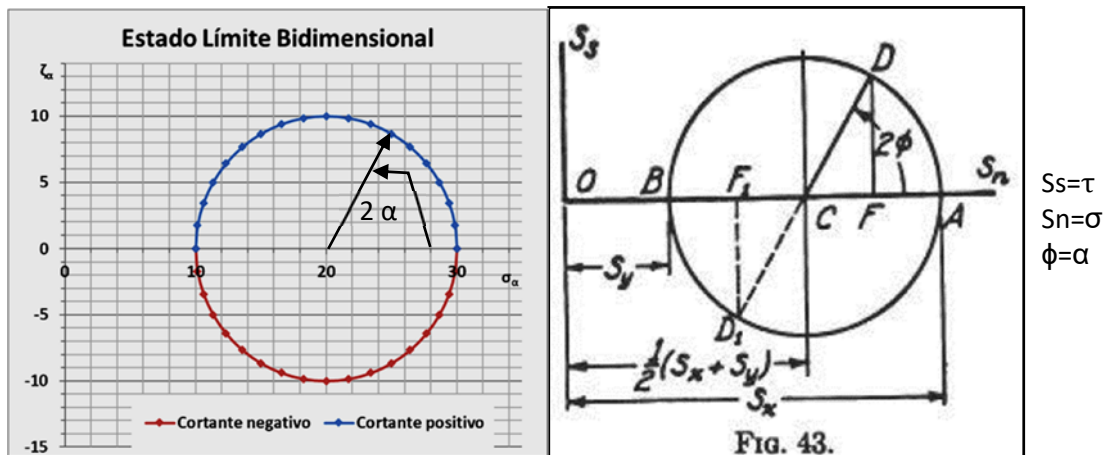


Figura 5 Esquema de Mohr para la representación del estado tensional complejo (La figura 43 tomada del Timoshenko1935)

En breves palabras, en la sección lo común es el estado tensional complejo, el problema planteado es determinar el valor de las tensiones para cada dirección en que se ubica el plano (N—Q) formando un ángulo (α).

La solución fue dada por O Mohr, de forma tal que para el estado bidimensional se establece un círculo cuyo radio está dado por la siguiente expresión:

$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \text{radio y el centro del círculo} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ en el eje $\sigma_\alpha \rightarrow \rightarrow$ Figura 5

Es necesario observar que la sección que se analiza gira un ángulo (α) con relación al plano principal Figura 6 y se representa por (2α) en el gráfico [5].

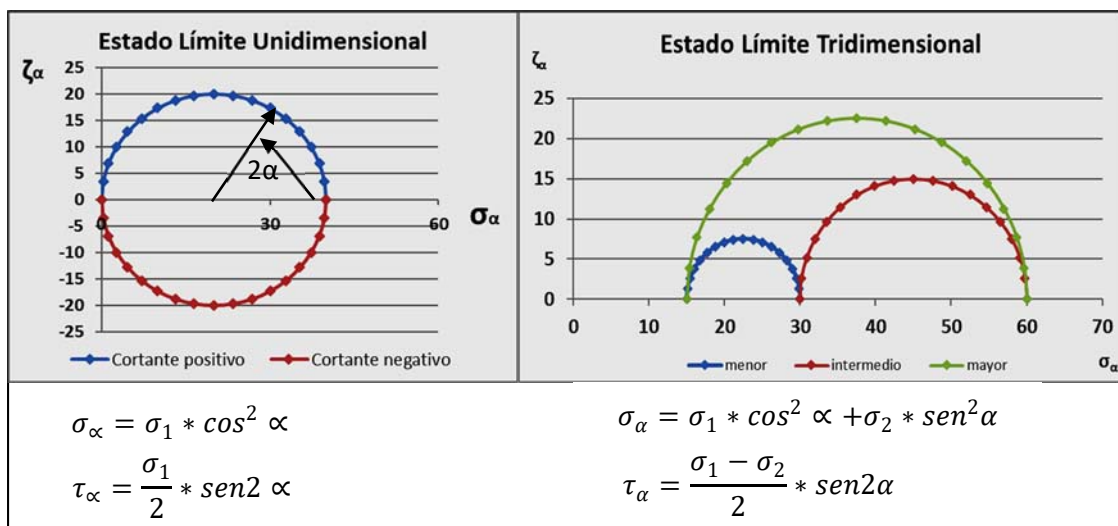


Figura 6 Círculo de Mohr y ecuaciones para diferentes estados tensionales

En la Figura 6, en la parte inferior se observan las expresiones correspondientes (la solución para el tridimensional se obtiene utilizando las expresiones del bidimensional). Los valores de τ_α son positivos por encima del eje (σ_α) y negativos por debajo Figuras 5 y 6.

Cada punto en el círculo representa un estado tensional (τ - σ) en una sección que forma un ángulo (α). Para ($\alpha=0$) se coincide con las tensiones principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)

1 Métodos

Si se realizan ensayos de rotura y se plotean los valores en un sistema de ejes (τ — σ) se obtiene una curva límite para ese material Figura 7 (izquierda).

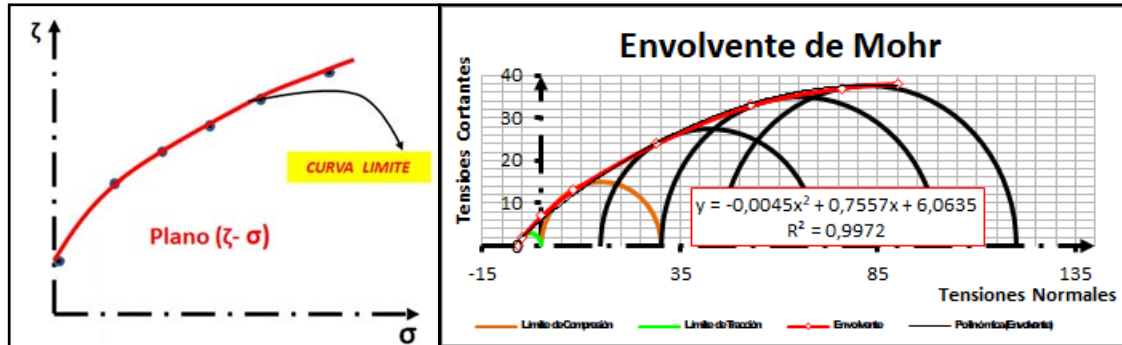


Figura 7 Concepto de Envolvente de Mohr

Los estados tensionales representados por los círculos de rotura son tangentes a la curva límite en los puntos límites *obteniéndose la envolvente de Mohr a los grandes círculos* y el criterio de fallo (τ — σ) Figura 7 (derecha).

La envolvente caracteriza a cada material ensayado 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”

El método que se utiliza en el trabajo se basa en seleccionar ensayos que se realizan en el laboratorio para formular la solución que permita determinar los parámetros de la envolvente de Mohr y los correspondientes estados tensionales.

Para los cálculos de los diferentes ensayos se utilizó el tabulador electrónico al cual se puede acceder mediante el vínculo [estado limite.xlsx](#) en el siguiente esquema se explica la forma de interactuar.

1

2

3

Introducir los datos de laboratorio del ensayo simple de Tracción y Compresión		$\sigma_{\text{compresión}}$	$\sigma_{\text{tracción}}$
		29,20	-2,30

Introducir datos del ensayo con matrices		
No	$\sigma_{a=x}$	$\tau_{a=y}$
1	8	13
2	29	24
3	53	33
4	76	37
5	90	38

Introducir datos del ensayo triaxial		
No.	σ_1	σ_3
1	40	6
2	78	18
3	113	34
4	136	52
5	148	64

El libro del tabulador electrónico consta de seis pestañas: 1-tracción-compresión, 2-cortante con matrices, 3-celda triaxial, 4-unidimensional, 5-bidimensional y 6-tridimensional.

Se interactúa con las tres primeras hojas representadas en este esquema con los números correspondientes **1-2-3**.

En las celdas indicadas se introducen los datos iniciales y se obtienen los resultados en las celdas de **resultados finales**, así como los gráficos correspondientes.

Es evidente que el método científico utilizado durante el trabajo es el Empírico

2 Resultados y discusión

2.1 Ensayos simples de tracción compresión

Como su nombre lo indica estos ensayos determinan las posibilidades del material a tracción o compresión Figuras 8 y 9.

Por definición siguiendo el criterio de fallo de Mohr, este ocurre mediante el estado tensional complejo donde actúan las tensiones ($\tau \sigma$).

En la Figura 8 se describe el esquema de cálculo y las fórmulas para obtener los parámetros del estado tensional límite, la envolvente y los resultados finales.

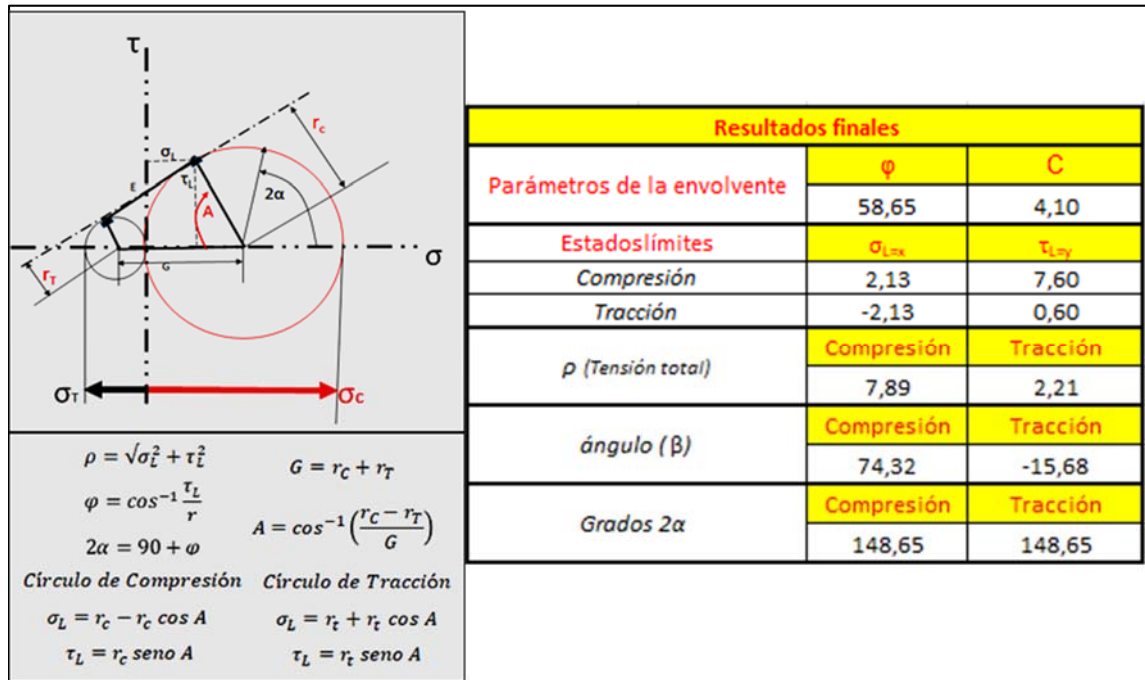


Figura 8 Esquema y fórmulas de cálculo

La aplicación del procedimiento se representa en la Figura 9 elaborándose en la UIC Pinar del Río una instrucción para determinar la capacidad portante del hormigón simple obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 10 ^[6]

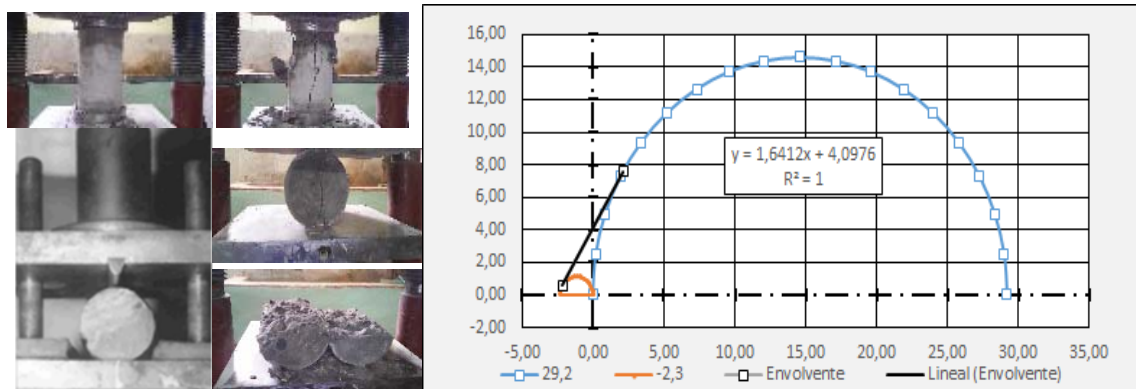


Figura 9 Envolvente de Mohr a partir de ensayos simples de compresión y tracción indirecta (Brasiliano)

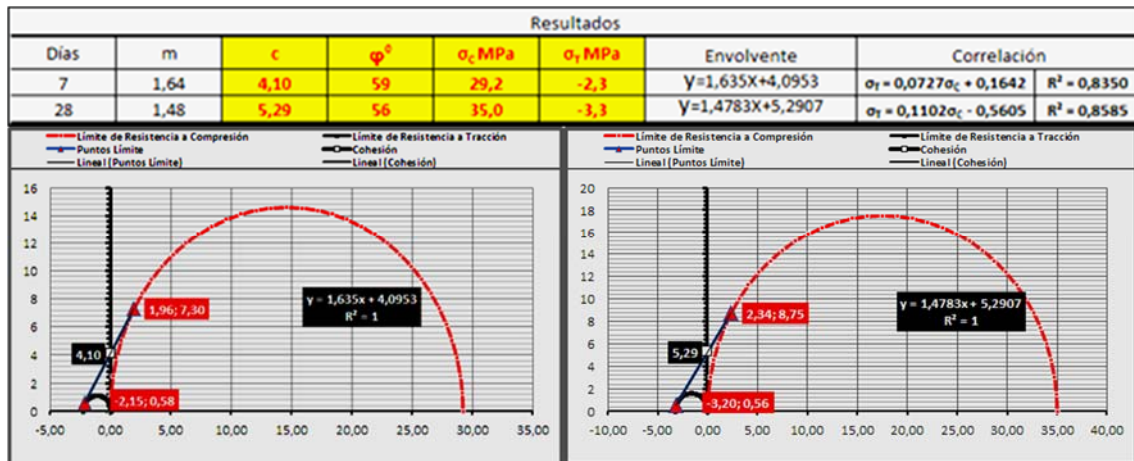


Figura 10 Análisis de las propiedades mecánicas del hormigón simple a los 7 y 28 días

2.2 Cortante con matrices

Este tipo de ensayo tiene la característica de que la probeta se encuentra confinada en la matriz Figura 11. Para suelos, extrema izquierda, 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 (observe la figura).

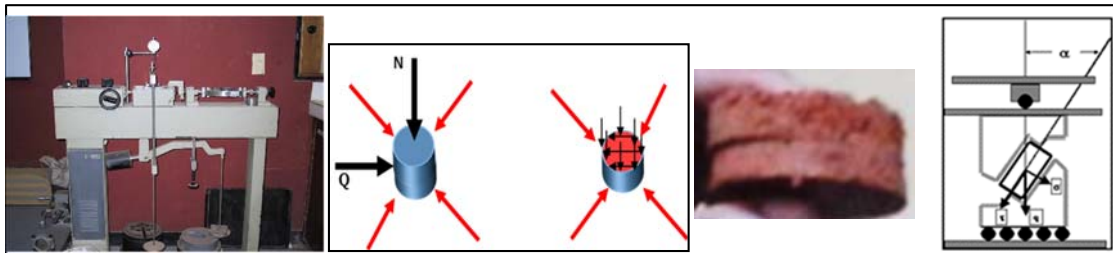


Figura 11 Características del ensayo

En rocas, extremo derecho, la matriz tiene un ángulo determinado y la carga se aplica verticalmente la cual para el cálculo se descompone en sus componentes, (Q—N) cortante indirecto. En ambos casos se obtienen $(\tau_\alpha - \sigma_\alpha)$ que responden a un estado tensional bidimensional $(\sigma_1 - \sigma_2)$ Figura 12

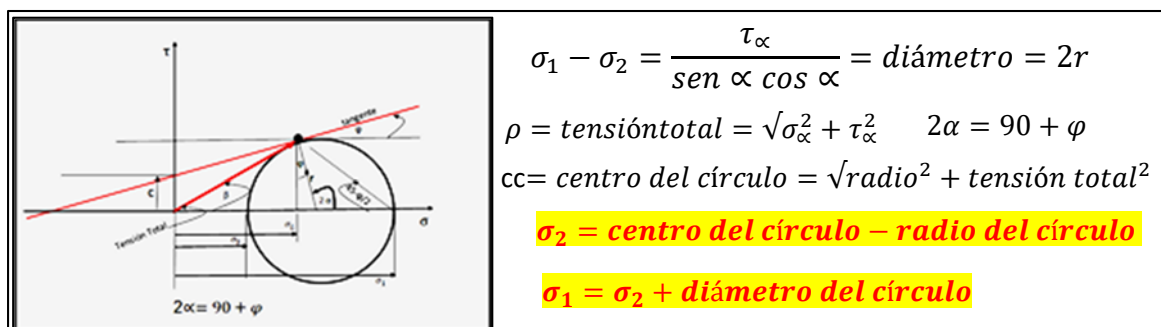


Figura 12 Esquema y fórmulas de cálculo

En el ensayo de suelos, con una misma matriz, a medida que aumenta la componente vertical aumenta τ_α 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.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros que caracterizan al estado tensional.

Tabla 1 Datos de laboratorio y estado tensional calculado para cada ensayo

Datos de laboratorio			Estado Tensional				
No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$	σ_1	σ_2	ρ	ángulo (β)	ángulo α
1	8	13	40	6	15	58	65
2	29	24	78	18	38	40	64
3	53	33	113	34	62	32	62
4	76	37	136	52	85	26	59
5	90	38	148	64	98	23	58

Utilizando los datos de laboratorio y el estado tensional calculado se puede plotear la envolvente y los círculos correspondientes a cada estado tensional Figura 13.

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 ($y = -0,0037x^2 + 0,6664x + 7,8819$ y $R^2 = 0,9998$) derivando la ecuación se obtiene ($\phi = 2 * 0,0037x + 0,6665$ -Rad) obteniéndose el ángulo de fricción interna para cada estado tensional.

Utilizando para cada estado tensional la ecuación de la recta tangente a la curva en el punto de tangencia, se obtiene ($C = y - mx$) el valor de la cohesión la cual aumenta a medida que ángulo de fricción interna disminuye Tabla 2

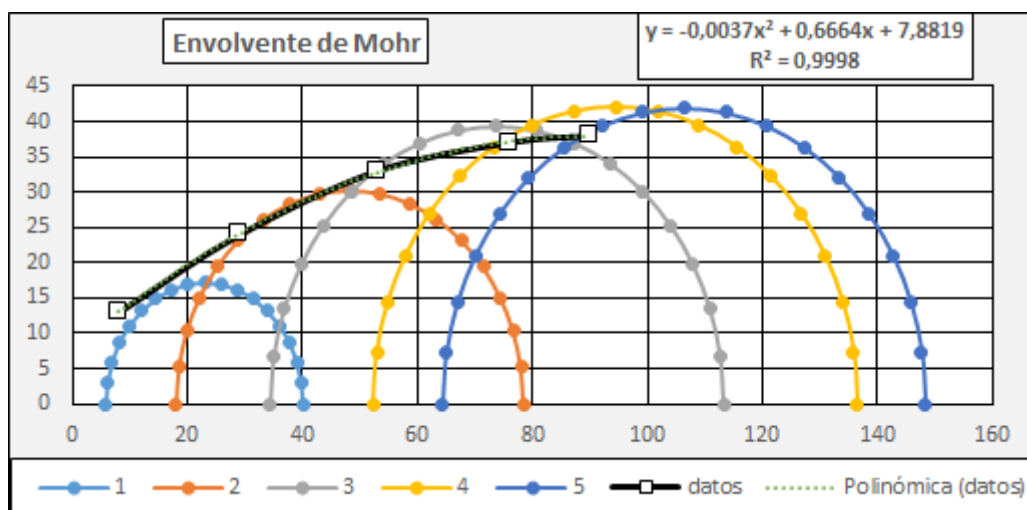


Figura 13 Envolvente de Mohr

Tabla 2 Parámetros de la envolvente

Ecuación línea de tendencia ($y = -0,0037x^2 + 0,6664x + 7,8819$)				Cohesión	$\phi = dy/dx = 2 * 0,0037 * x + 0,6665$	$C = \tau_{\alpha} - m x$
No	y	x	x^2	C	ϕ	Radianes
1	13	8	64	7,8819	34,71	0,61
2	28	29	841		25,81	0,45
3	44	53	2809		15,63	0,27
4	60	76	5776		5,88	0,10
5	69	90	8100		0,06	0,00

Por otra parte, el vector tensión total (ρ) aumenta y el ángulo de equilibrio (β) disminuye Tabla 3, Figura 14

Tabla 3 Vector tensión total

Datos de laboratorio			Vector tensión total		
No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$	$\beta=\text{acot}(\tau_{\alpha}/\sigma_{\alpha})$	ángulo (β)	ρ
1	8	12	0,98	56,31	14
2	29	24	0,69	39,61	38
3	53	33	0,56	31,91	62
4	76	37	0,45	25,96	85
5	90	38	0,40	22,89	98

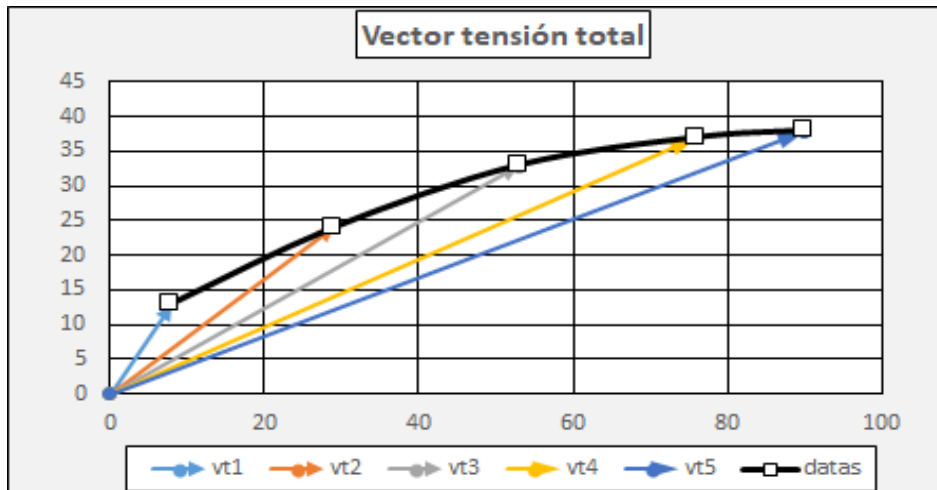


Figura 14 Vector tensión total para cada estado tensional

La Tabla 4 recoge los resultados finales del ensayo

Tabla 4 Resultados finales

Resultados finales									
Datos de laboratorio			Estado tensional					Parámetros en cada estado tensional	
No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$	σ_1	σ_2	ρ	ángulo (β)	ángulo α	ϕ	C
1	8	13	40	6	15	58	65	34,71	7,46
2	29	24	78	18	38	40	64	25,81	9,98
3	53	33	113	34	62	32	62	15,63	18,17
4	76	37	136	52	85	26	59	5,88	29,17
5	90	38	148	64	98	23	58	0,06	38,09

2.3 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 y en este caso simularemos la celda utilizando los valores obtenidos de los estados tensionales principales en el epígrafe anterior Figura 15—16 y Tabla 5

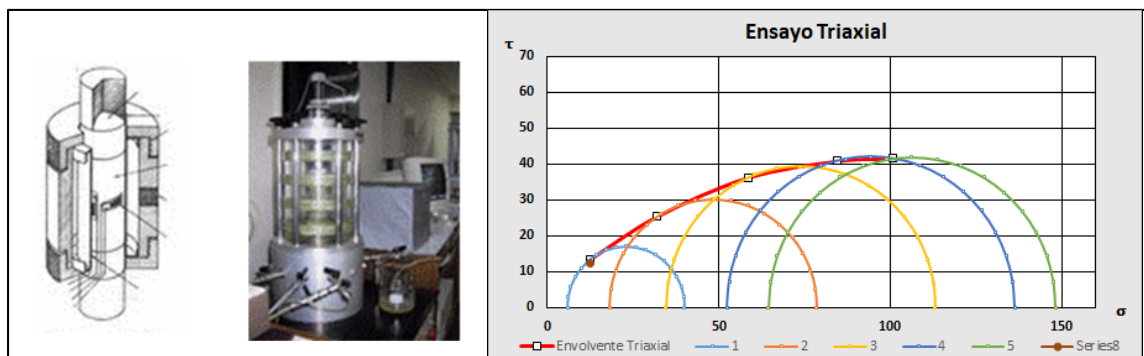


Figura 15 Envolvente de Mohr a partir de celdas triaxiales

El esquema de cálculo y las fórmulas correspondientes se observan en la Figura 16

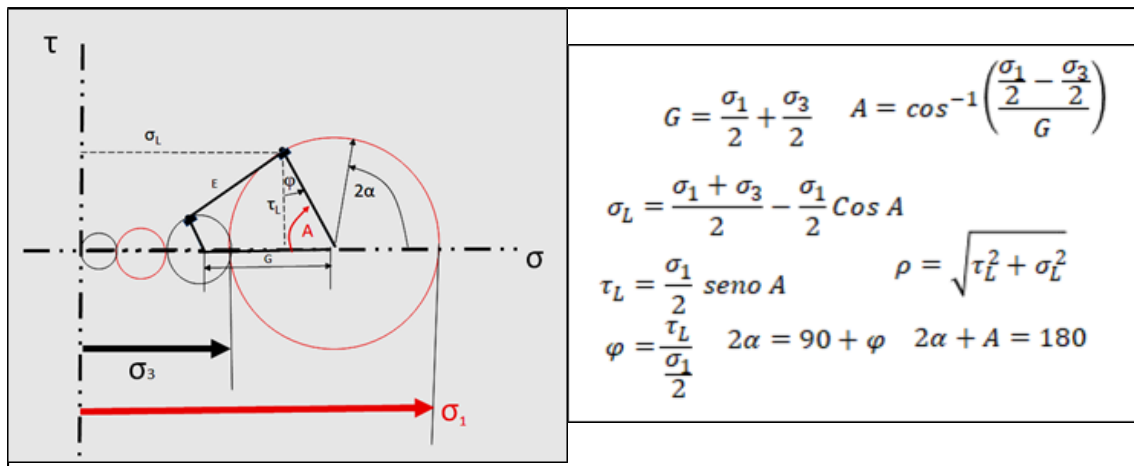


Figura 16 Esquema y fórmulas de cálculo

Tabla 5 Estados tensionales principales obtenidos del epígrafe anterior mediante el ensayo con matrices

σ_1	σ_3
40	6
78	18
113	34
136	52
148	64

Para chequear el cálculo se utilizó además del valor de los puntos límites las envolventes respectivas. Tabla 6

Tabla 6 Puntos límites en el cortante con matrices (envolvente directa) y mediante la simulación del ensayo triaxial (envolvente inversa)

Envolvente directa		Envolvente Inversa	
Puntos Límites obtenidos en el laboratorio de Cortante		Puntos límites mediante la simulación del ensayo triaxial	
$\sigma_{L=x}$	$\tau_{L=y}$	$\sigma_{L=x}$	$\tau_{L=y}$
8	13	12	13
29	24	32	25
53	33	58	36
76	37	85	41
90	38	101	42

La Figura 17 muestra ambas envolventes:

se ha llamado **–directa–** a la que proviene de los puntos límites obtenidos del ensayo con matrices

–inversa– a la que se obtiene mediante los puntos límites calculados a partir de la simulación del estado tensional principal obtenido mediante las matrices en la celda triaxial.

Observe la coincidencia casi total entre ambas envolventes.

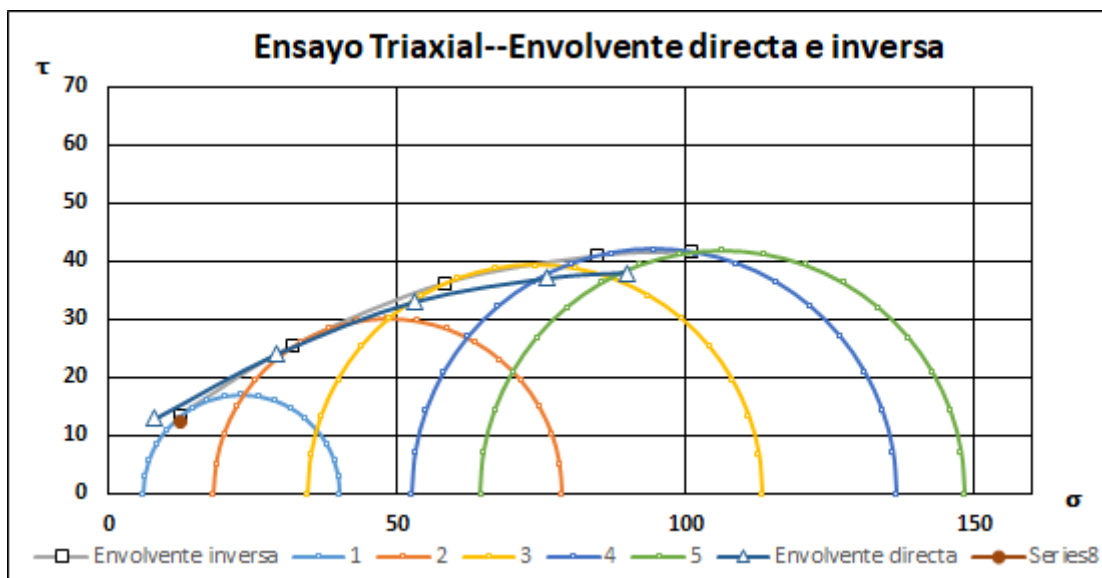


Figura 17 Verificación gráfica del cálculo del ensayo triaxial

Los resultados finales y la envolvente se observan en la Tabla 7 y la Figura 18

Tabla 7 Resultados finales y estados tensionales correspondientes

No.	Introducir datos del ensayo triaxial		Resultados finales de los parámetros del estado tensional							
	σ_1	σ_3	σ_{Lm}	τ_{Lm}	ρ	ángulo (β)	Grados φ	Rad φ	$C=y-mx$	Grados 2α
1	40	6	12	13	18	47	38	0,67	4	128
2	78	18	32	25	41	38	33	0,57	5	123
3	113	34	58	36	69	32	23	0,40	11	113
4	136	52	85	41	94	26	13	0,23	21	103
5	148	64	101	42	109	22	8	0,13	28	98

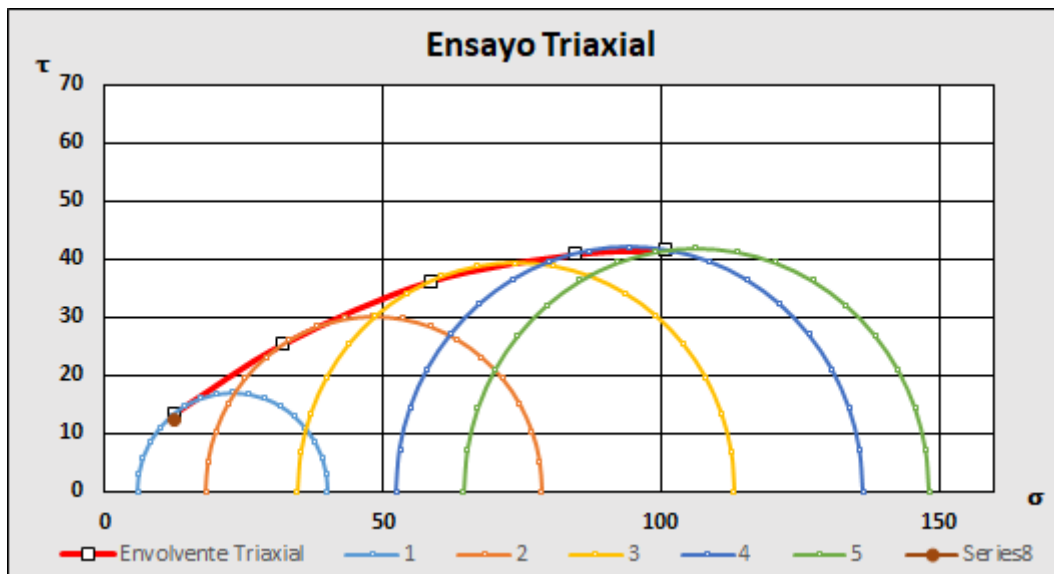


Figura 18 Envolvente de Mohr correspondiente al ensayo triaxial

3 Aplicación a la evaluación mecánica del macizo geológico

En la Geomecánica pronosticar las características mecánicas del macizo geológico constituye el problema fundamental.

Siempre se comienza con la evaluación mecánica del macizo geológico, por tanto, es evidente la aplicación de la teoría de Mohr para conseguir este objetivo.

La utilización del criterio de rotura de Mohr, de forma universal, se utiliza mediante soluciones aproximadas como se señaló al inicio de este documento.

La solución que se propone utiliza la envolvente sin modificación ninguna, tal y como se obtiene de los resultados en el laboratorio, por tanto, es necesario representar las características del macizo geológico donde se ejecuta la obra (condiciones externas).

3.1 Concepto de macizo geológico

Una región cualquiera del Atlas Nacional de Cuba del año 1970, en nuestro caso, posee los mapas siguientes:

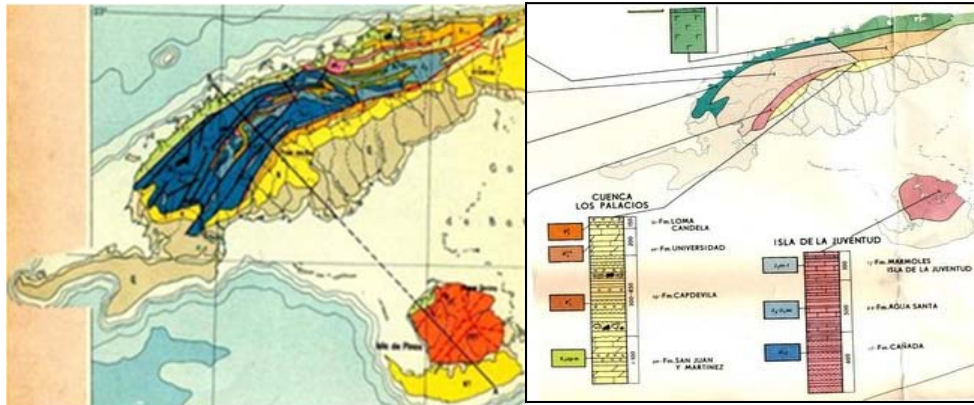


Figura 19 Mapas geológico y estructuro-facial con las formaciones geológicas.

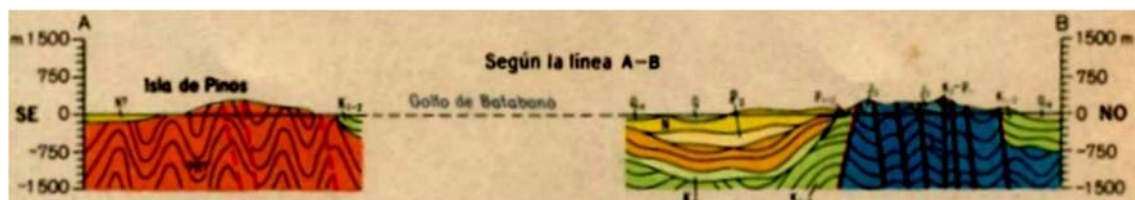


Figura 20 Perfil desde Isla de Pinos hasta Pinar del Río.

El mapa geológico donde se localizan los aspectos relacionados con las rocas, su edad, la tectónica, etc.

Del mapa geológico se obtiene las columnas estratigráficas que incluyen las formaciones geológicas y sus principales rocas. Figura 19

En el mapa geológico por la línea A-B se ha trazado un perfil en el que se indica la forma en que yacen los diferentes tipos de rocas, así como la posición de estas en profundidad. Figura 20

También el mapa tectónico donde se señalan las fracturas de las diferentes formaciones y el mapa sísmico que contiene los criterios probables de intensidad. Figura 21

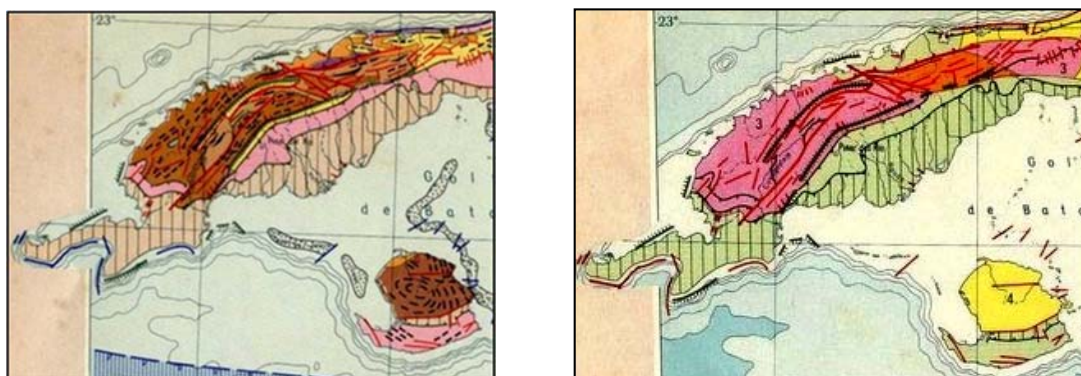


Figura 21 Mapas tectónico (izquierda) y sísmico (derecha)

Si se adiciona a la zona de estudio el hidrogeológico se deduce que el **medio** donde se ejecutará la obra es de naturaleza compleja y por tanto simplificar su estudio a los resultados obtenidos en una probeta de laboratorio no sería real. Figura 22

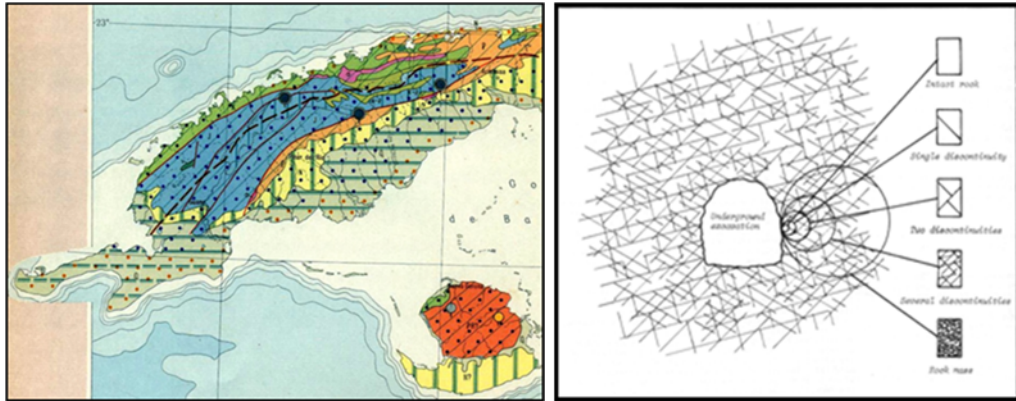


Figura 22 Mapa hidrogeológico (izquierda) y esquema de una obra subterránea (derecha).

En la misma figura a la derecha se representa el macizo alrededor de una obra subterránea. Los círculos indican la heterogeneidad y la anisotropía del medio geológico.

Las representaciones a la derecha en forma de testigos muestran el tipo de macizo si la obra tuviera el área correspondiente a cada uno de los círculos.

Desde un macizo sin grietas a otro totalmente fracturado, es evidente que no se tiene la posibilidad de obtener testigos cuyo diámetro sea el del círculo mayor y rigurosamente hablando, el del menor.

Tal situación provoca la falta de representatividad de las muestras que se llevan al laboratorio, debido a su tamaño.

Las muestras obtenidas para ensayo se caracterizan por no poseer los defectos del medio y sencillamente no los representa a esto se le llama **factor de escala**.

Se utiliza durante el trabajo el término de **macizo geológico** para identificar el medio geológico, este puede estar formado por suelos, rocas, semirocas en dependencia de la solidez del material que lo constituye.

Habitualmente a un perfil ingeniero geológico se le asignan términos para identificarlos en función de las rocas que lo forman. Figura 23

Este corresponde a la sección de una excavación en la ciudad de Pinar del Río

Están presentes en esta zona las capas siguientes:

Capa 1 - Arena limosa

Capa 1A - Arena limosa gravosa

Capa 2 - Arcillas

Las características mecánicas de las mismas se observan en el gráfico.

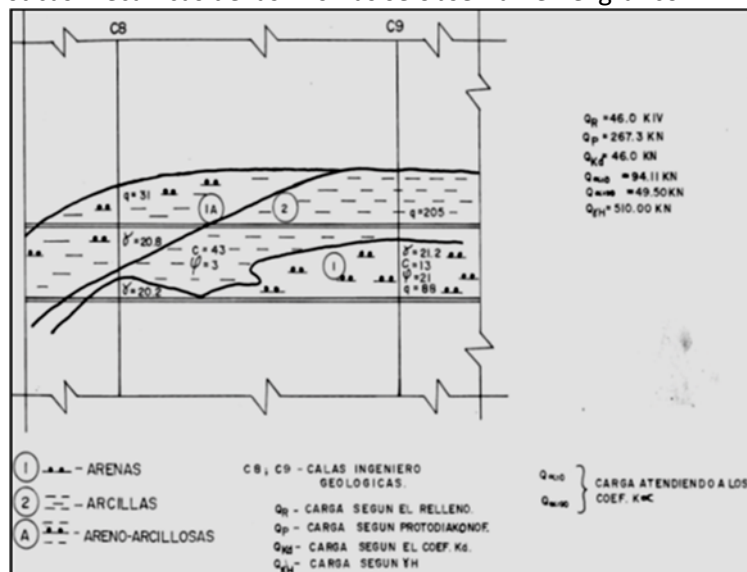


Figura 23 Perfil de una excavación en la ciudad de Pinar del Río.

Finalmente, como clasificación general del macizo geológico se aplica en este trabajo la de Valeri Davidovich Lomtadze profesor del Instituto de Minas de Leningrado (San Petersburgo). Su clasificación eminentemente práctica se identifica con el Macizo geológico en los siguientes términos:

Rocas
Semiropas
Suelos Coherentes
Suelos Granulares

“la evaluación mecánica del macizo geológico su interpretación y sus características constituye el objetivo de la aplicación de este trabajo”. Figura 24

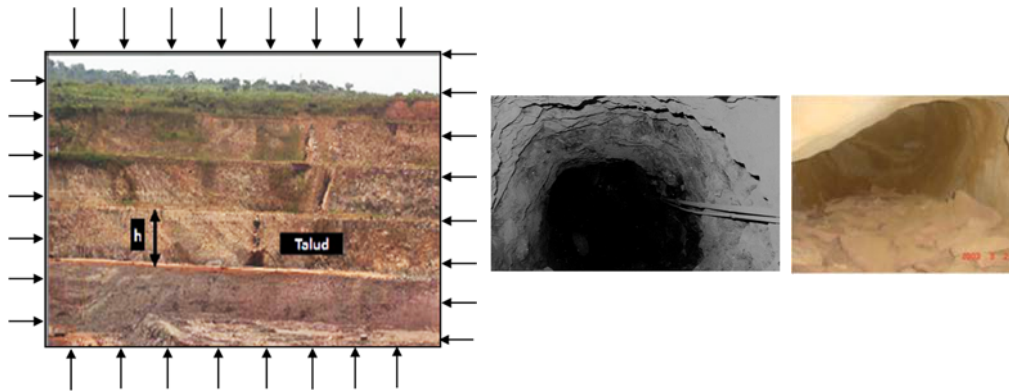


Figura 24 El macizo geológico en la Geomecánica

En Resistencia de los materiales se analiza el estado tensional en la sección del elemento estructural, en la Geomecánica se analiza en el macizo geológico.

“La solución se traslada a un punto del macizo geológico en el cual se debe conocer el estado tensional reinante para poder comparar con la tensión total que aquel es capaz de resistir”

3.2 Capacidad portante del macizo geológico

Este término, capacidad portante del macizo geológico, se define como “factor de escala” sobre el cual se han emitido muchos procedimientos.^[7]

Los procedimientos se identifican; desde pronosticar el comportamiento mecánico utilizando el tamaño de la probeta de ensayo hasta las clasificaciones geomecánicas.

3.3 Ensayos mecánicos mínimos necesarios para este procedimiento.

Se asocia la clasificación de Lomtadze con la recuperación que se obtiene durante la exploración ingeniero geológica y la forma de las probetas que pueden obtenerse para los ensayos.

3.3.1 Las rocas

Permiten obtener probetas con formas geométricas regulares, generalmente cilíndricas. Figura 25

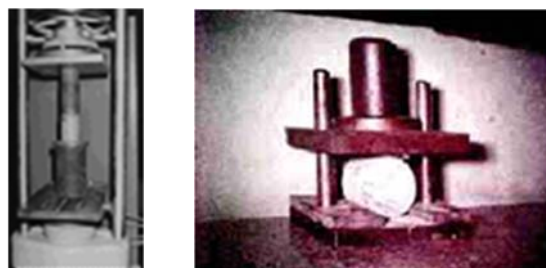


Figura 25 Ensayos de compresión directa (izquierda) y tracción indirecta (Brasiliano)

3.3.2 Las semirocas

Generalmente se obtienen probetas semiregulares e irregulares. Figura 26

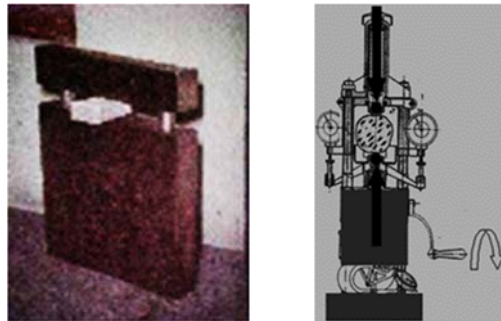


Figura 26 Ensayos de muestra semiregular (corte y fragmentación, izquierda) muestra irregular (derecha)

3.3.3 Los suelos coherentes

Muestras regulares y al ser remoldeados adquieren la forma que necesitamos para el ensayo. Figura 27 y 28



Figura 27 Prensa de ensayo a compresión simple para suelos

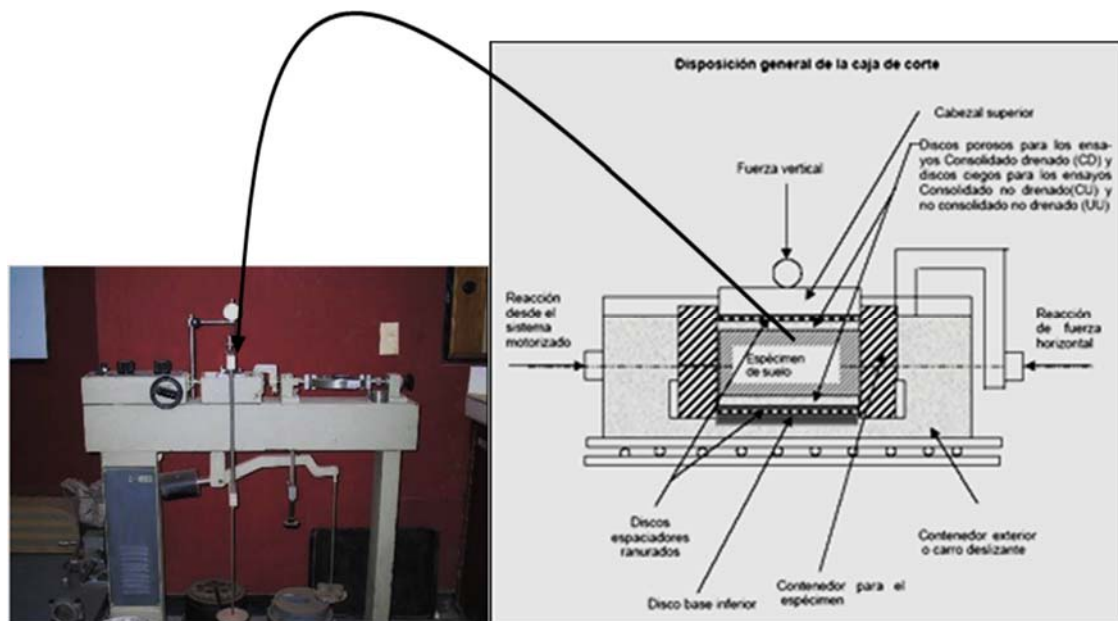


Figura 28 Ensayo de cortante directo en suelos

Para mayor información consulte el texto Geomecánica 1ra Parte de Rafael Martínez Silva ISBN 978-959-16-0631-1 de la Editorial Universitaria en el repositorio de la universidad de Pinar del Río <https://rc.upr.edu.cu/>.

Los dispositivos de corte y fragmentación fueron diseñados por Rafael Martínez Silva y se utilizan en los laboratorios de la UIC-ENIA Pinar del Río.

3.4 Determinación de la capacidad portante del macizo geológico

3.4.1 Coeficientes de cálculo

En párrafos precedentes se señaló que en la solución del “factor de escala” se utilizan muchos procedimientos, en el trabajo que se presenta se seleccionó el de los coeficientes de cálculo. Surge de la siguiente definición:

“...factores que tratan de representar las condiciones del medio geológico que, multiplicados por la resistencia de la roca intacta obtenida en el laboratorio, pronostican las características mecánicas de resistencia del macizo geológico...”

Los coeficientes de cálculo forman un grupo mínimo que permite caracterizar el macizo geológico. Su selección es particular y es probable que se adicionen aún más que los que se aplican en este trabajo.

La ecuación general es la siguiente:

$$[\sigma_{\text{macizo geológico}} = (\eta_{\text{agua}} \times \eta_{\text{reológico}} \times \eta_{\text{sísmico}} \times \eta_e) \times \sigma_{\text{intacta}}]$$

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

$$\eta_{\text{reológico}} = \frac{\sigma_{\text{para un tiempo } t \rightarrow \infty}}{\sigma_{\text{para un tiempo } t \rightarrow 0}} \rightarrow \rightarrow$$

Para rocas de comportamiento frágil al destruirse: 0,9 – 1,0

Para rocas que experimentan deformaciones plásticas antes de destruirse: 0,6 – 0,8

$\eta_{\text{sísmico}} \rightarrow$ depende de las normas de cada región \rightarrow puede llegar hasta un 20 % de la resistencia estática

$$\eta_{\text{estructural}} = f\left(\frac{(L) \rightarrow \text{longitud máxima de la excavación}}{(c) \rightarrow \text{distancia media entre superficies de debilitamiento}}\right) \rightarrow \rightarrow \text{Figura 29}$$



Figura 29 Coeficiente de debilitamiento estructural

3.4.2 Condiciones externas

Se llaman condiciones externas aquellas que presenta el macizo geológico y que resultan de la multiplicación de los datos del laboratorio por los coeficientes de minoración Tabla 9:

Tabla 8 Concepto de condiciones externas

Datos		Condiciones externas = datos X Coef.		Coeficientes de Minoración de la Roca Intacta			
$\sigma_{compresión}$	$\sigma_{tracción}$	Minoración		$\eta_{debilidadEstructural}$	$\eta_{reológico}$	$\eta_{aguas\ subt.}$	$\eta_{sísmico}$
29,20	-2,30	18,69	-1,47	0,80	1,00	0,80	1,00

Es evidente que cuando los coeficientes se igualan a la unidad estamos en presencia de la “roca intacta”

Los coeficientes dependen de las características del medio en que se ejecuta la obra, no necesariamente se limitan a los utilizados en este procedimiento.

3.4.3 Coeficiente del Estado Tensional Natural

El estado tensional natural constituye el factor inicial en la cuantificación de la “carga externa” para definir las componentes del mismo se aceptan las ecuaciones siguientes:

La Tensión Vertical:

$$\sigma_v = \gamma \times h \rightarrow MPa$$

$$\sigma_v = 0,027 \times Z \rightarrow MPa$$

En este trabajo, para la **Modelación del Estado Tensional Natural** la superior se utiliza en Suelos y la inferior en Rocas.

La Tensión Horizontal se expresa mediante la siguiente relación:

$$\sigma_H = K \times \sigma_v$$

Para cuantificar (K) se pueden determinar insitu las tensiones horizontales y verticales. Cuando no sea posible se toma la data del Hoek & Brown de 1980.

Es evidente que las Tensiones Horizontales y Verticales formen una Resultante bajo un ángulo determinado cuyo valor depende de la magnitud de estas.

Si se asume que:

$$\sigma_v = \text{Tensión Vertical} = 1$$

Se obtiene

$$\sigma_H = \text{Tensión Horizontal} = K \times \sigma_v$$

En la Figura 30 se observa la Resultante que se obtiene al sustituir los valores precedentes

$$\eta_{\text{Estado Tensional}} = \sqrt{1^2 + K^2}$$

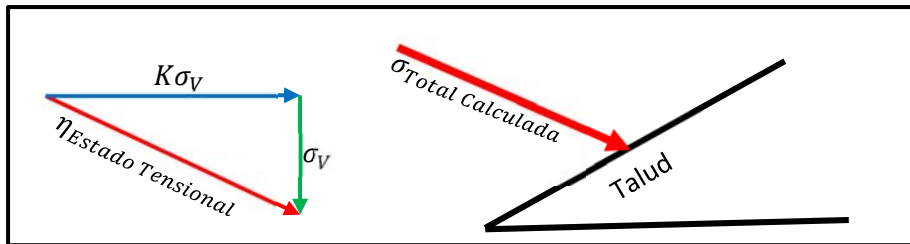


Figura 30 Determinación del Coeficiente de Estado Tensional y la Tensión Total Calculada

$$\sigma_{\text{Total Calculada}} = \sigma_{\text{Total Límite}} \times \eta_{\text{Estado Tensional}}$$

3.4.4 Determinación de la condición de “fallo”

Para aplicar el concepto de “fallo” (Figura 31) utilizando la Teoría de Mohr se debe cumplir que:

para $K = 0 \rightarrow \rho_{macizo} \geq \gamma \times H$ en suelos ó $\rho_{macizo} \geq 0,027 \times Z$ para rocas.

para $K > 0 \rightarrow \rho_{macizo} \geq K(\gamma \times H)$ en suelos ó $\rho_{macizo} \geq K(0,027 \times Z)$ para rocas

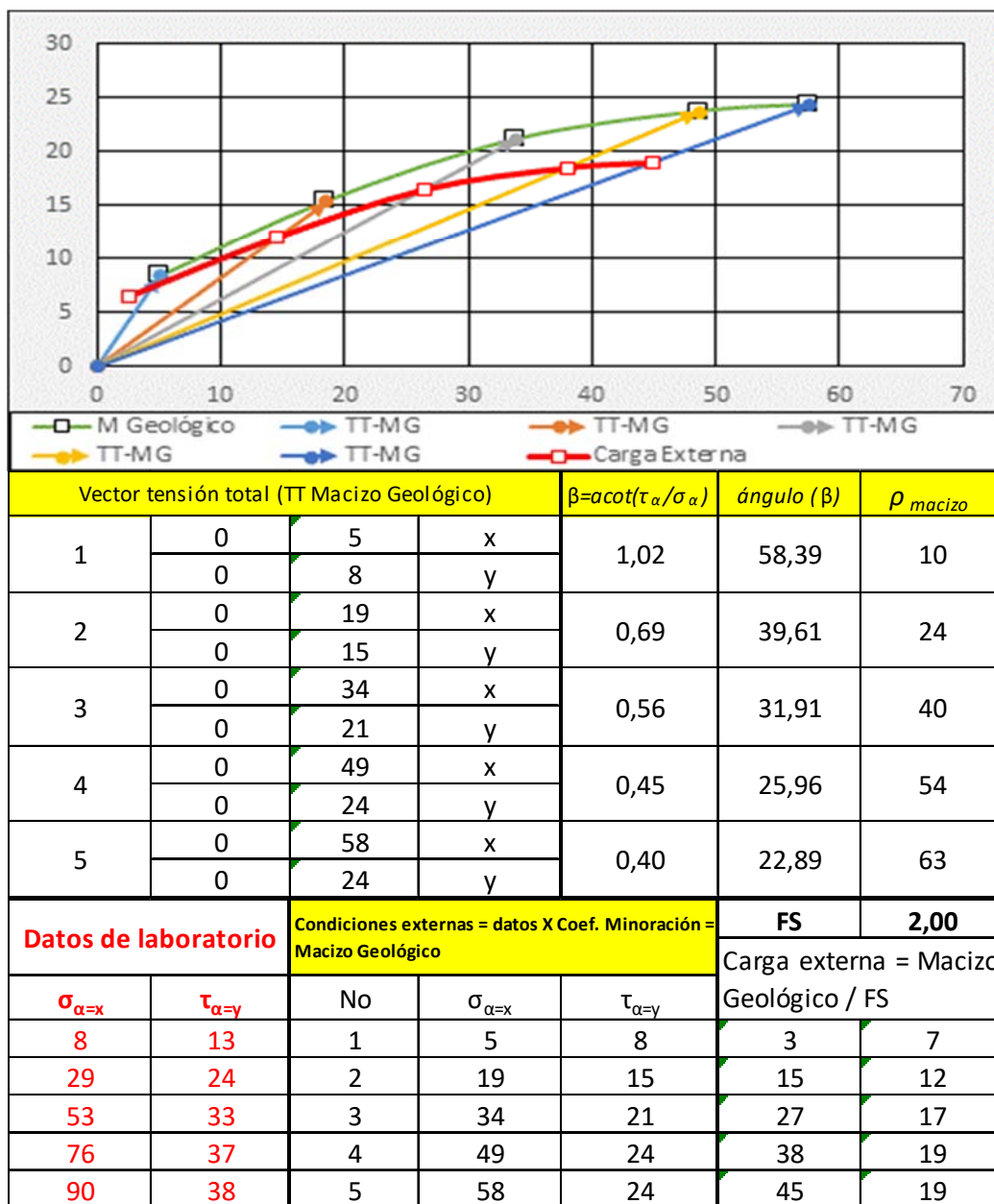


Figura 31 Vector tensión total del macizo geológico y la carga externa

Para modelar la carga externa se utilizó un FS= 2 (factor de seguridad).

Acceda al vínculo [condición de fallo.xlsx](#)

3.5 Utilización del tabulador electrónico en el cálculo

El libro del tabulador electrónico consta de seis pestañas: 1-tracción-compresión, 2-cortante con matrices, 3-celda triaxial, 4-unidimensional, 5-bidimensional y 6-tridimensional. Acceda al vínculo [capacidad portante del macizo geológico.xlsx](#)

Se interactúa con las tres primeras representadas en este epígrafe con los números correspondientes **1-2-3**.

En las celdas indicadas se introducen los datos iniciales y se obtienen los resultados en las celdas de **color verde y letras blancas**, así como los gráficos correspondientes. Figuras 32-33-34

3.5.1 Ensayo de tracción—compresión

Los límites de resistencia de tracción y compresión pueden obtenerse mediante todo tipo de probetas, regulares, semiregulares e irregulares.

Identificando los límites de rotura con los círculos máximos es posible obtener la envolvente
Figura 32

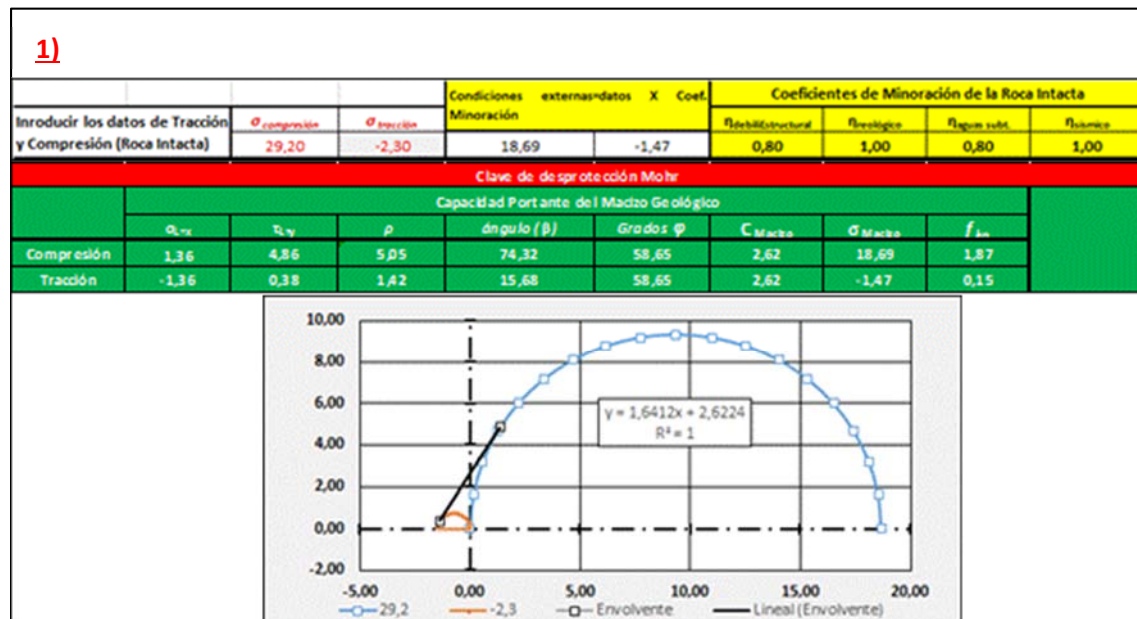


Figura 32 Tracción—compresión para el macizo geológico

Los resultados para los estados tensionales de tracción y compresión independientes se observan en las celdas de color verde y fuente de color blanco. Es evidente que la cohesión y el ángulo de fricción interna tengan los mismos valores para la zona de tracción que de compresión, debido a que se trata del mismo material.

Para la solución de “fallo” se obtienen las condiciones límites para ambos estados principales, así como la resistencia del macizo geológico a tracción y compresión.

3.5.2 Cortante con matrices

En el ensayo se obtienen las componentes del estado límite las cuales se multiplican por los coeficientes para obtener las condiciones externas.

De esta forma se repite el cálculo como fue explicado en epígrafes anteriores y se obtiene la envolvente al macizo geológico y los parámetros de cada estado tensional ensayado así como las tensiones principales Figura 33

2)

Introducir datos del ensayo con matrices			Condiciones externas=datos X Coef. Minoración		
No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$	No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$
1	8	13	1	5	8
2	29	24	2	19	15
3	53	33	3	34	21
4	76	37	4	49	24
5	90	38	5	58	24

Coeficientes de Minoración de la Roca Intacta			
$\eta_{debiliEstructural}$	$\eta_{reológico}$	$\eta_{aguas\ sub.}$	$\eta_{sismico}$
0,80	1,00	0,80	1,00

Clave de desprotección Mohr									
Capacidad Portante del macizo geológico para diferentes condiciones externas									
No	$\sigma_{\alpha=x}$	$\tau_{\alpha=y}$	σ_1	σ_2	ρ	ángulo (β)	ángulo α	φ	C
1	5	8	26	4	10	58	65	34,64	4,77
2	19	15	50	12	24	40	64	25,71	6,48
3	34	21	72	22	40	32	61	15,50	11,57
4	49	24	87	34	54	26	59	5,72	18,87
5	58	24	95	41	63	23	58	0,24	24,43

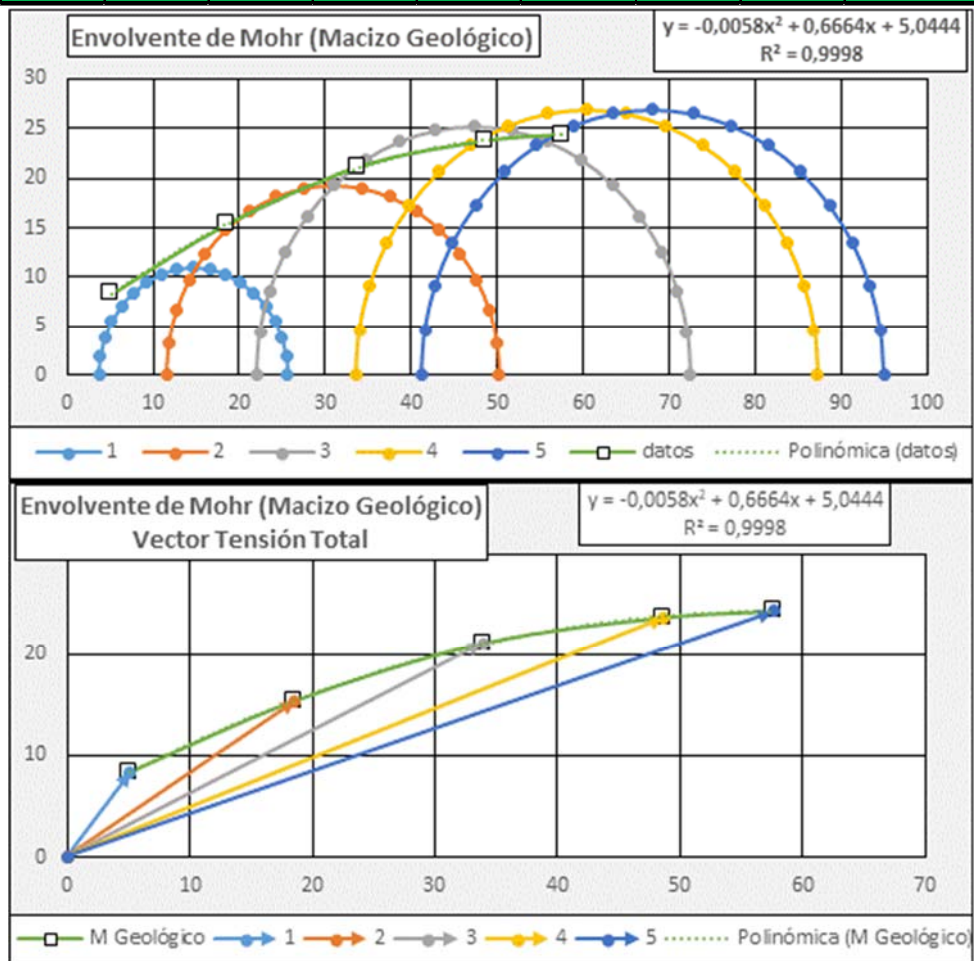


Figura 33 Cortante con matrices para el macizo geológico

3.5.3 Celda triaxial

En este tipo de ensayo se conocen las tensiones principales y se calcula el estado limite correspondiente Figura 34

3)

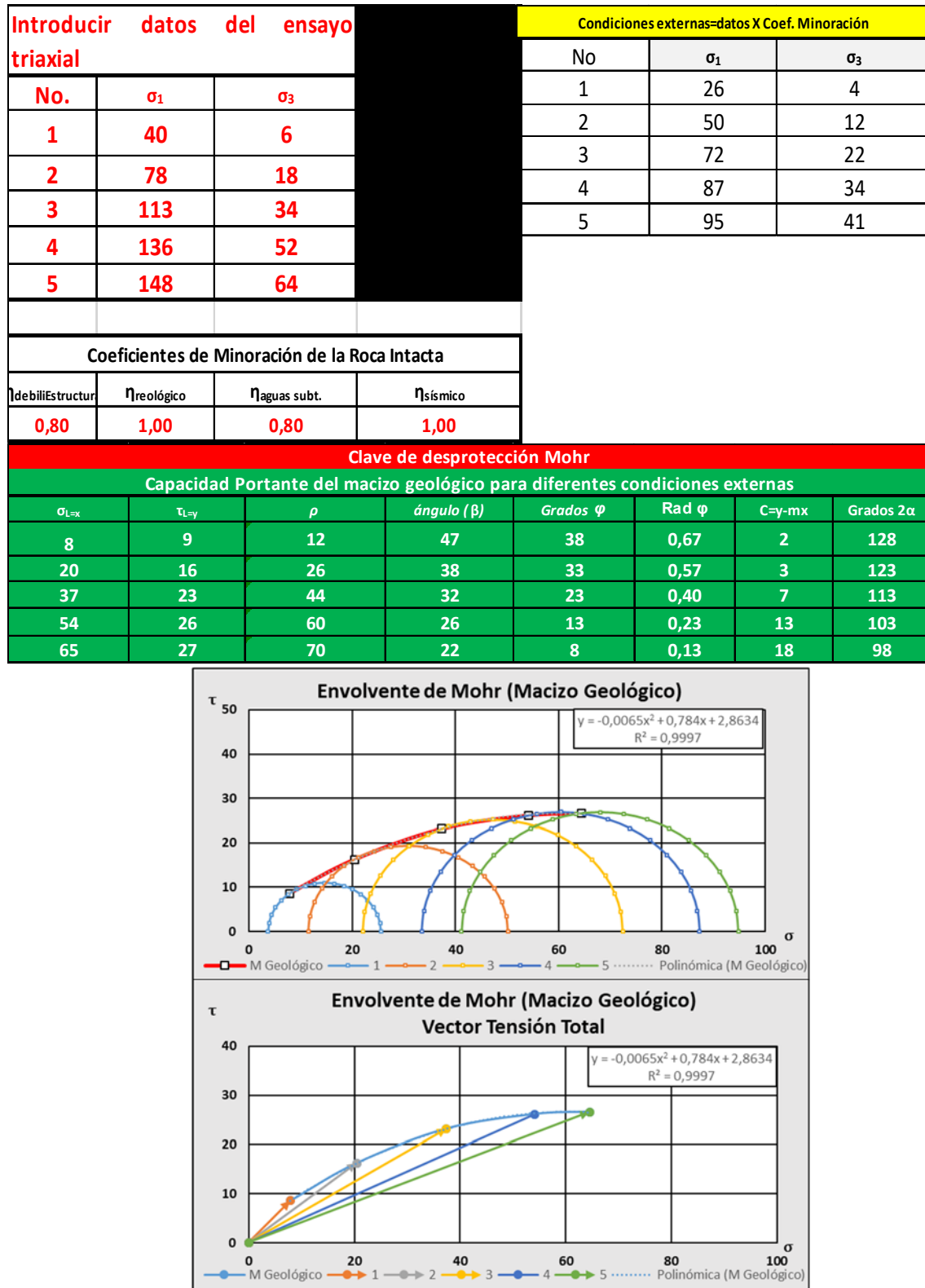


Figura 34 Celda triaxial para el macizo geológico

Los resultados expresan la evaluación mecánica del estado tensional. Como en casos anteriores la envolvente se identifica con los estados tensionales a los cuales es sometido el macizo geológico

4 Novedad científica

Se obtiene la envolvente real del material ensayado, lo que permite pronosticar el estado límite correspondiente a cada estado tensional solicitado.

5 Bibliografía

1. Rupineit KB, Liberman YI. Bbidenie Mejaniku Gornig Parod. Moscú: 1960.
2. Martinez Silva Rafael. 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. Available from: <https://rc.upr.edu.cu/>
3. González de Vallejo. Ingeniería Geológica. Madrid--España: 2004.
4. E. Hoek & E. T. Brown. "Underground Excavations in Rock". Instituto de Minas y Metalurgia de Londres: 1980.
5. S P Timoshenko, G H MacCullough. Elements of Strenght of Materials. University of Michigan Libraries 1817: 1935.
6. Martinez Silva Rafael, Vilau Urquiaga Luis. Determinación de la Capacidad Portante del Hormigón Simple utilizando la Teoría de Mohr [Internet]. Pinar del Río: Universidad de Pinar del Río--Unidad de invesigaciones para la construcción (ENIA); 2016. Available from: <https://rc.upr.edu.cu/>
7. Martinez Silva Rafael. Geomecánica 3ra Parte (Estabilidad) Red Universitaria CUBA <http://catalogo.reduniv.edu.cu>) ISBN 978-957-16-1043-0 Rafael Martinez Silva [Internet]. 2011. Available from: <https://rc.upr.edu.cu/>