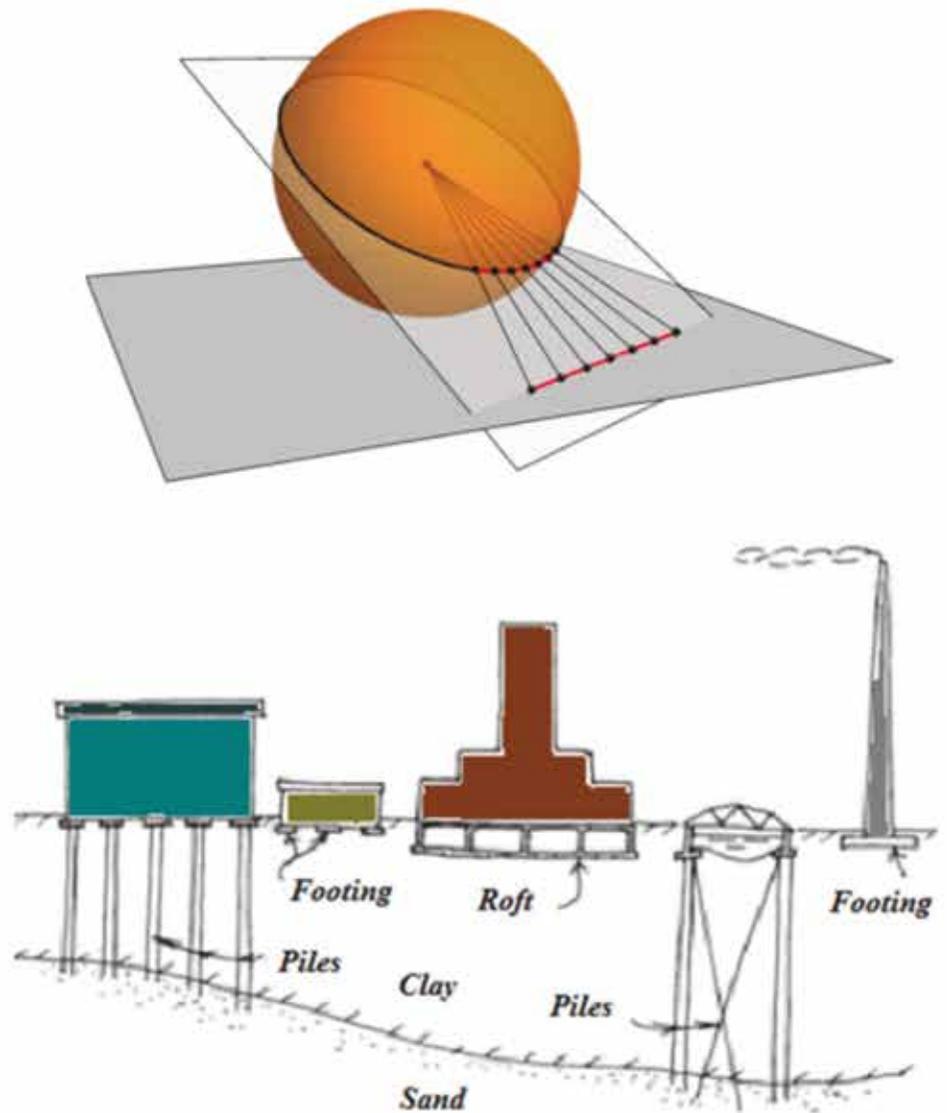
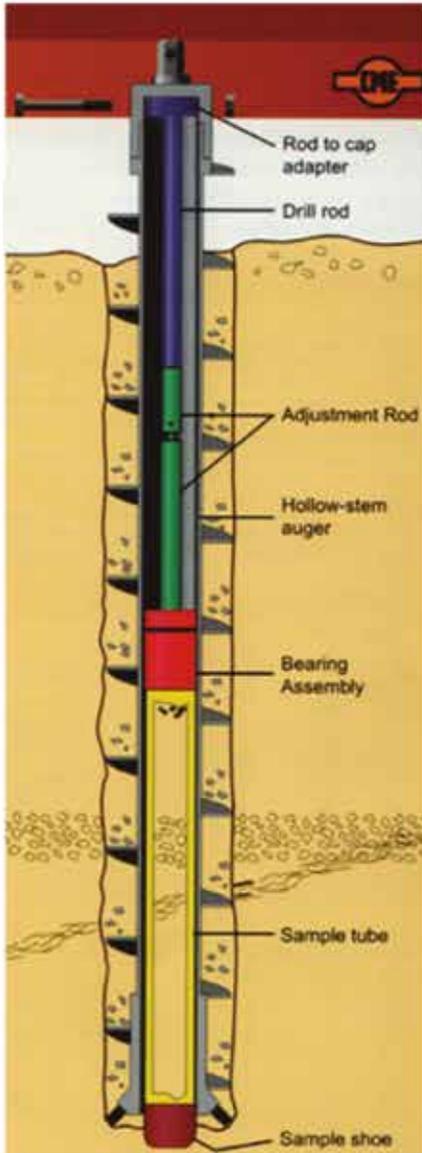


GEOTÉCNIA PARA INGENIERÍA CIVIL



Marco Masabanda C.
Byron Morales Muñoz
Hugo Bonifaz



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Geotécnia para ingeniería civil

Marco Masabanda C; Byron Morales Muñoz y Hugo Bonifaz

Primera edición electrónica. Octubre de 2018

ISBN: 978-9942-765-29-1

Revisión científica: Ruth Lorena Pérez Maldonado y Kervin Chunga

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Crnl. Ing. Ramiro Pazmiño O.

Rector

Publicación autorizada por:

Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Cpvn. Hugo Pérez

Presidente

Edición y producción

David Andrade Aguirre

daa06@yahoo.es

Diseño

Pablo Zavala A.

Derechos reservados. Se prohíbe la reproducción de esta obra por cualquier medio impreso, reprográfico o electrónico.

El contenido, uso de fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias es de **exclusiva responsabilidad del autor.**

Los derechos de esta edición electrónica son de la **Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE**, para consulta de profesores y estudiantes de la universidad e investigadores en: <http://www.repositorio.espe.edu.ec>.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. General Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador.

<http://www.espe.edu.ec>



GEOTÉCNIA PARA INGENIERÍA CIVIL

Marco Masabanda C.
Byron Morales Muñoz
Hugo Bonifaz

GEOTÉCNIA

Concepto

Es la rama de la ingeniería en la que la mecánica de suelos, la mecánica de rocas y la geología se encuentran íntimamente relacionadas para desarrollo de la ingeniería civil.

$$\begin{array}{ccccccc} M & & S & + & M & & R & + & G & & = & \textit{Geotecnia} \\ \textit{mecánica} & & \textit{suelos} & & \textit{mecánica} & & \textit{rocas} & & \textit{ciencia} & & \textit{moderna} \end{array}$$

Se dirige a la caracterización de suelos y rocas en el subsuelo para definir el tipo de cimentación de estructuras.

Historia

Nace en la década de los años 30, en Estados Unidos ocurre un hecho muy importante, una falla en la presa de San Francisco, se rompe. Este hecho hace que se investiguen todas las posibilidades. La conclusión a la que llegó, fue que estuvo bien diseñada en cuanto a los cálculos de ingeniería civil, es entonces cuando se contrata un geólogo. Recién para la década de los 40, aparece la Geología Aplicada.

Luego de la Segunda Guerra Mundial, aparece el ingeniero geólogo, en 1950 el ingeniero geotécnico y en 1970 aparece la ingeniería Aplicada.

La geotecnia puede determinar soluciones para:

- Cimentaciones
- Gestión ambiental
- Riesgos naturales
- Contaminación (aire, suelo, agua)
- Erosión
- Mal manejo de recursos naturales
- Desastres naturales

Caracterización de suelos y rocas

Roca: material sólido, duro, resistente y cohesivo. Constituido por uno o varios minerales

Son aquellas que van afectar a la construcción de obras de ingeniería civil, pueden ser físicas y mecánicas. Debemos tomar en cuenta que las rocas nos proveen el material de construcción, hormigón, material de excavación, sitio de cimentación de estructura. (Fig.1)

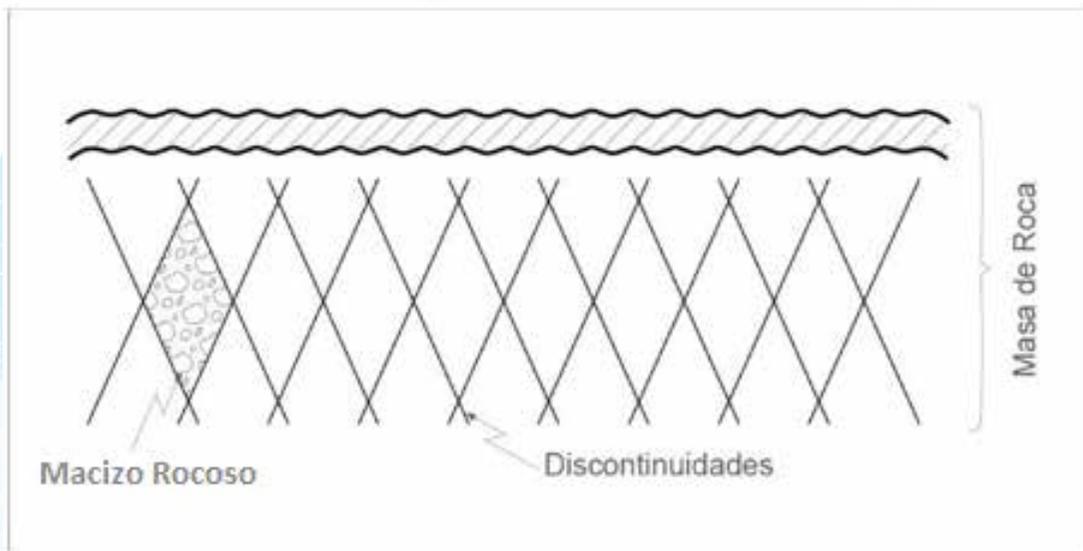


Figura 1 Propiedades de las rocas.
Fuente: Autores

Masa de roca y sustancia rocosa.

- Discontinuidades.- es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza y separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso, su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte. (Vallejo, 2002)
- Juntas.- son grietas planificadas previamente para el control de fisuras.
- Fisuras.- son aberturas que no se pueden controlar y afectan la parte superficial de un elemento.
- Diaclasas.- es una fractura o fisura en un elemento rocoso donde no se observa un desplazamiento mayor que una mínima separación transversal.
- Planos de estratificación.- son superficies que limitan los niveles de rocas o sedimentos de una roca estratificada.

- Planos de foliación.- son superficies desarrolladas por minerales durante el metamorfismo, que posee una estructura en capas paralelas derivada de su origen tectónico.
- Fallas.- son la rotura en las rocas debido a un movimiento o desplazamiento el cual genera un plano de falla.

Uso de la roca en ingeniería civil:

- Tenemos que se relaciona con ingeniería civil.
- Material de construcción (hormigón que tiene como materia prima el ripio, que no es más que una roca triturada, fisurada)
- Material de excavación
- Material de cimentación.

Para ingeniería civil existen suelos y rocas.

roca+discontinuidades=masa rocosa (Masizo rocoso)

Las discontinuidades presentan superficies a lo largo de las cuales cambian la resistencia al corte.

Suelo: en ingeniería civil se lo considera como cualquier material no consolidado, no solidificado.

Suelo es el conjunto de partículas no consolidado con gases y líquidos incluidos, se pueden distinguir 3 fases

Con las fases del suelo tiene masa y volumen relacionados. Se puede integrar las relaciones volumétricas y gravimétricas. (Fig. 2)



Figura 2. Composición del suelo.

Fuente: Terzaghi K. (1943)

V_a : Volumen del aire

W_a : Peso de aire

V_w : Volumen de agua

W_w : Peso del agua

V_s : Volumen de sólidos

W_s : Peso de sólidos

V : Volumen total

W : Peso total

De estas se desprenden las siguientes ecuaciones:

Volumen de vacíos

$$V_v = V_a + V_w$$

Ecuación 1. Volumen de vacíos

Peso específico aparente húmedo

$$\gamma_h = \frac{W}{V}$$

Ecuación 2. Peso específico aparente húmedo

Porosidad

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Ecuación 3. Porosidad

Índice de vacíos

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Ecuación 4. Índice de vacíos

Saturación

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

Ecuación 5. Saturación

Propiedades ingenieriles de las rocas

Tabla 1 Propiedades de las rocas.

Relaciones volumétricas	Resistentes al corte	Parámetro Elásticas
Peso específico	Resistencia a la compresión simple (uniaxial)	Relación de Poisson (Coeficiente de Poisson)
Porosidad	Resistencia a la compresión confinada	
Absorción de agua	Resistencia a la tracción	Módulo elástico
	Resistencia al corte	
Permeabilidad	Dureza	Velocidad de ondas de compresión Velocidad de ondas de corte
	Durabilidad	

Para diferenciar entre suelo o roca se puede utilizar la resistencia a la compresión según ISRM.

Tabla 2 Ensayo de índice manual de resistencia de roca de campo.

Clase	Descripción	Identificación del campo	Valor aproximado de la resistencia a compresión simple	
			Mpa	Kg/cm ²
S ₁	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0.025	< 0.25
S ₂	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0.025 - 0.05	0.25 - 0.5
S ₃	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para penetrar el dedo	0.05 - 0.1	0.5 - 1
S ₄	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0.1 - 0.25	1 - 2.5
S ₅	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0.25 - 0.5	2.5 - 5.0
S ₆	Arcilla dura	Se marca con dificultad al marcar con la uña	> 0.5	> 5.0

R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25 – 1.0	2.5 - 10
R ₁	Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayarse con una navaja. Se talla fácilmente con una navaja	1.0-5.0	10-50
R ₂	Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo	5.0-25	50-250
R ₃	Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra en mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo penetra hasta 5 mm	25-50	250-500
R ₄	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra, especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo	50-100	500-1000
R ₅	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	100-250	1000-2500
R ₆	Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca.	> 250	> 2500

Fuente: Tomada de ISRM (1981)

Relaciones gravimétricas y volumétricas

Propiedades físicas: Propiedades que tienen que ver con la estructura del material y los vacíos en el interior.

Propiedades mecánicas: se relacionan con el comportamiento de los sólidos bajo la acción de un esfuerzo. Tratamos de estudiar todas las propiedades determinadas sobre especímenes de roca (sustancia rocosa) se hace sustracción de las discontinuidades.

Todas estas discontinuidades van a disminuir las propiedades de la roca.

Determinación de las propiedades ingenieriles en el laboratorio.

Contenido de agua en rocas

El contenido de agua de una roca se expresa como un porcentaje de agua libre en una masa dada y la masa del material sólido. (Figura 3)

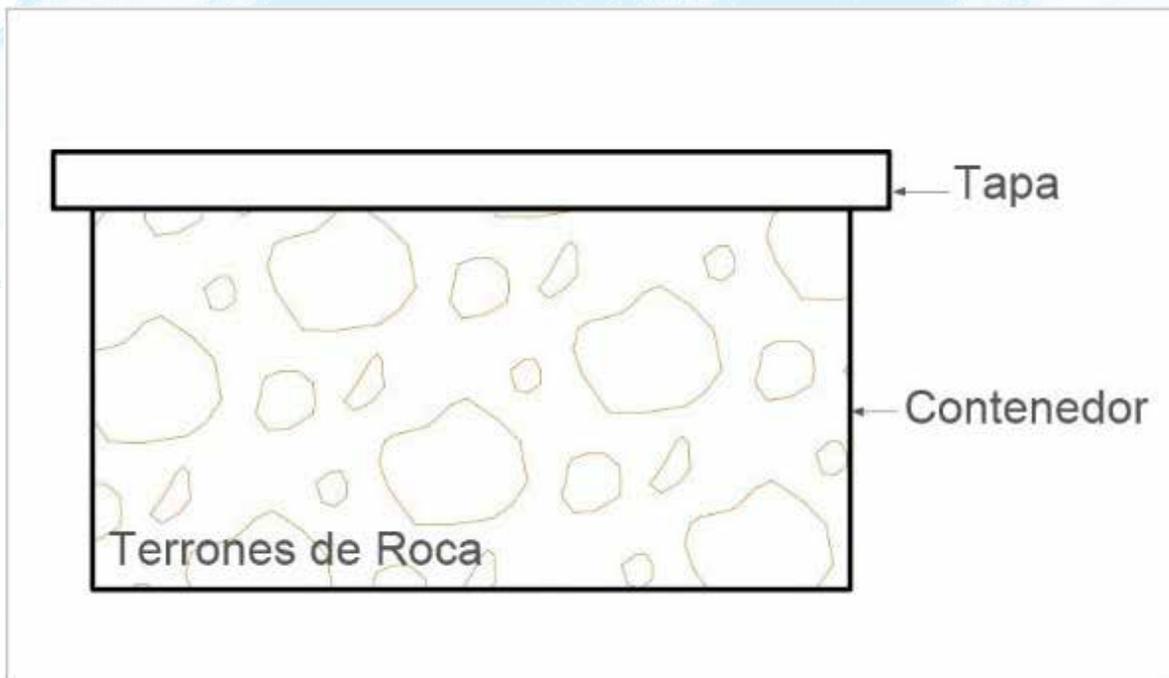


Figura 3. Contenido de humedad.
Fuente: Autores

$$\%W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} * 100$$

$$\%W = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

Ecuación 6. Porcentaje de contenido de humedad

%W: Porcentaje del contenido de humedad

M_{cws} : Masa del recipiente + muestra húmeda

M_{cs} : Masa del recipiente + muestra seca

M_c : Masa del recipiente

M_s : Masa de las partículas secas

M_e : Masa del agua

Tabla 3 Masa mínima del material húmedo representativa de la masa total.

Tamaño máximo de la partícula (pasante de 100%)	Tamaño estándar del tamiz	Masa mínima recomendada de la muestra, de pruebas húmedas reportadas del contenido de agua a %	Masa mínima recomendada de la muestra, de pruebas húmedas reportadas del contenido de agua a %
2 mm o menos	No. 10	20g	20g
4.75 mm	No. 4	100g	20g
9.5 mm	3/8-in	500g	50g
19.0 mm	3/4-in	2.5kg	250g
37.5 mm	in	10kg	1kg
75.0 mm	3-in.	50kg	5kg

Fuente: Norma ASTM D 2216-98

Ensayo de laboratorio para determinar el contenido de humedad de una muestra (ROCA).

Norma: ASTM D 2216-1

Equipo:

- Horno temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza de precisión de 0.01% del peso total de una muestra de hasta 200g.
- Recipientes con tapa resistentes a la corrosión.

Procedimiento:

- Determinar y registrar la masa del recipiente seco y limpio
- Seleccionar la muestra de acuerdo a la tabla de muestras representativas.
- Colocar la muestra húmeda en el recipiente y determinar la masa de la muestra húmeda + recipiente.
- Colocar el recipiente con la muestra húmeda en el horno mantener hasta obtener una masa constante, esto dependerá del tipo de material y tamaño de la muestra.
- Retirar el recipiente del horno ayudado de unas pinzas, dejar que se enfríe a temperatura ambiente hasta que se pueda manipular con facilidad.
- Tomar la masa del recipiente + muestra seca, proceder con los cálculos.

Datos:

Tabla 4 Datos para cálculo de porcentaje de humedad roca basalto.

Recipiente	Masa recipiente (g)	Masa recipiente + Suelo húmedo (g)	Masa recipiente + suelo seco (g)
35 ^a	12.18	358.96	358.79

Cálculos:

$$W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} * 100$$

$$W = \frac{358.96 - 358.79}{358.79 - 12.18} * 100$$

$$\%W = \frac{0.170}{346.58} * 100$$

$$\%W = 0.049$$

Absorción:

Norma: ASTM C127-07

Es la cantidad de agua que adquiere una roca durante un determinado tiempo, sumergida y a una temperatura igualmente determinada.

Los factores son: Tiempo y temperatura.

La cantidad que adquiere es siempre menor a aquella cantidad teórica que podría asignársele a una roca. Jamás una roca se satura al 100% de sus poros.

$$\text{Absorción \%} = \frac{(B - A)}{A} 100$$

Ecuación 7. Porcentaje de absorción

donde:

A: masa en el aire de la muestra seca al horno.

B: masa en el aire de la muestra saturada superficialmente seca

C: masa aparente en agua de la muestra saturada.

Grado de saturación:

Es la relación que existe entre el volumen de los poros llenos de agua y el volumen total de poros.

Peso específico de las rocas (G):

Denominado también como peso unitario es la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

$$G = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}} = \left[\frac{F}{L^3} \right]$$

Ecuación 8. Peso específico de las rocas

Peso: sinónimo de fuerza $F=m \times a$ por lo tanto $\left[M \times \frac{L}{T^2} \right]$

Volumen: en tres dimensiones $V=L^3$

GA: peso específico aparente, es el más común utilizado. Considera tanto el volumen de los sólidos como el volumen de vacíos.

GV: peso específico verdadero. Considera únicamente el volumen de los sólidos.

$$GV > GA$$

La diferencia entre los dos es más pequeña cuando menos porosa es la roca.

Densidad de las rocas (γ):

La densidad nos permite obtener información de la composición de la roca. El rango de variabilidad de la densidad de las rocas es mucho mayor que la de los suelos.

Es una propiedad elemental de los materiales, relacionada con la naturaleza y la porosidad existente entre las rocas.

$$\gamma = \frac{M}{V} [ML^{-3}]$$

Ecuación 9. Densidad de las rocas

M: masa de la muestra

V: volumen de la muestra en tres dimensiones

γ_A : Densidad aparente, es una propiedad del suelo directamente relacionada con la estructura, que nos indica el grado de compactación del suelo. Es la relación entre la masa por una unidad de volumen y en éste se incluyen los huecos que presenta el suelo.

γ_V : Densidad verdadera, sólo tiene en cuenta la densidad de las partículas que lo componen.

El valor medio se sitúa en torno a 1.35 g/cm³ (1.1 y 1.7 Mg/m³), que indica un suelo con buena estructura y volumen de huecos.

La relación entre densidad aparente y real nos da a conocer sobre la porosidad que hay en el suelo.

Ensayo de laboratorio para determinar la gravedad específica de una muestra (ROCA).

Gravedad específica:

Norma: ASTM C127-07

Es la relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

Equipo:

- Horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Balanza con sensibilidad de 0.05% del peso total de la muestra.
- Canastillas metálicas.
- Tanque de agua con un flotador externo para mantener el nivel del agua.
- Dispositivo de suspensión.
- Tamices (un tamiz de 4.75mm de abertura N°4 y los que se puedan requerir).

Tabla 5 Cantidades mínimas para ensayo.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra	
Mm	Pulg	Kg	Lb
hasta 12.5	½	2	4.4
19	¾	3	6.6
25	1	4	8.8
37.5	1 ½	5	11
50	2	8	17.6
63	2 ½	12	26.4
75	3	18	39.6
90	3 ½	25	55
100	4	40	88
112	4 ½	50	110
125	5	75	165
150	6	125	275

Fuente: Tomada de INV-223-07

Procedimiento:

1. Se considera las cantidades mínimas para ensayo.
2. Secar la muestra en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, enfriar al aire a la temperatura ambiente hasta que el agregado sea manipulable (aproximadamente a 50°C).
3. Sumergir la muestra en agua, también a temperatura ambiente, durante un período de 15 a 19 horas.
4. Sacar la muestra del agua y secar las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial

- visible, secando individualmente los fragmentos mayores.
5. Determinar la masa de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (sss).
 6. Colocar la muestra en el interior de la canastilla metálica y determinar su masa sumergida en el agua, a la temperatura de $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ y con una densidad de $997 \pm 2 \text{ kg/m}^3$.
 7. Secar entonces la muestra en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, enfriar al aire a la temperatura ambiente hasta que el agregado sea manipulable (aproximadamente a 50°C), posteriormente se determina su masa.

Cálculos:

Gsb $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$: gravedad específica bulk, $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$

Gsb_{sss} $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$: gravedad específica bulk sss, $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$

Gsa $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$: gravedad específica aparente, $23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}$

A: masa en el aire de la muestra seca en gramos

B: masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en gramos

C: masa sumergida en agua de la muestra saturada, en gramos.

$$Gsb_{23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}} = \frac{A}{B - C}$$

$$Gsb_{sss\ 23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}} = \frac{B}{B - C}$$

$$Gsa_{23^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Gpr y A es el valor verdadero de la gravedad específica y absorción respectivamente.

$$Gpr = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2} + \dots + \frac{P_n}{100G_n}}$$

$$A = \frac{P_1A_1}{100} + \frac{P_2A_2}{100} + \dots + \frac{P_nA_n}{100}$$

donde:

P_1, P_2, \dots, P_n : Porcentajes respectivo de la masa de cada fracción con respecto a la masa total de la muestra.

G_1, G_2, \dots, G_n : Gravedades específicas (bulk, bulk saturada con superficie seca o aparente la que se esté calculando) de cada fracción de la muestra total.

A_1, A_2, \dots, A_n : Porcentajes de absorción de cada fracción de la muestra total.

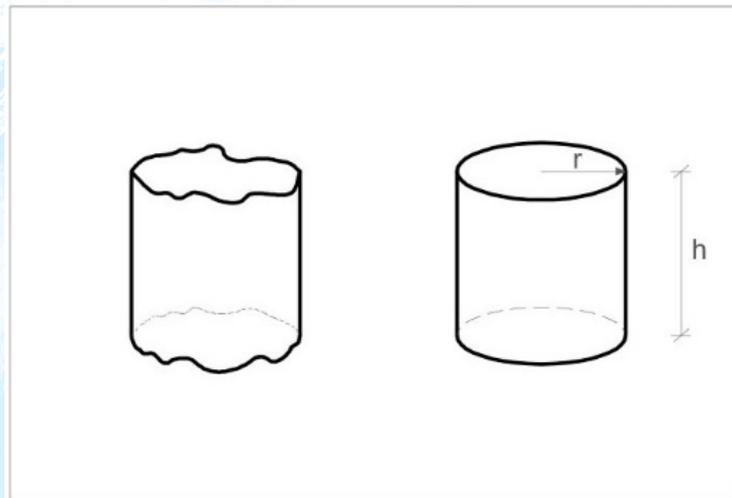


Figura 4 . Espécimen de roca
Fuente: Autores

Ensayo de laboratorio para determinar porosidad y densidad de una muestra (ROCA)

Norma: ISRM Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties.

Este método tiene aplicación en el caso de las rocas no friables, es decir, que pueden ser cortadas solo por máquinas, tampoco es aplicable en rocas que se hinchen o se expandan con la saturación de agua (propiedad de expansibilidad), la técnica a aplicarse se llama Saturación por Inmersión, y se trabaja sobre especímenes de forma geométrica rectangular. (Figura 4)

En algunos casos el valor de porosidad es suficiente, pero para una descripción completa se requerirá además del valor de densidad. Un valor bajo en la densidad seca de la roca generalmente concuerda con un valor de porosidad alto.

Equipo:

- Horno (capaz de mantenerse a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas)
- Una canastilla de alambre suspendida desde la balanza por un alambre delgado de manera que solo el alambre intercepte a la superficie de agua del baño de inmersión.
- Un baño de inmersión
- Balanza de laboratorio: precisión 0.01% del peso total de la muestra
- Recipientes de material no corrosible
- Un recipiente con agua para saturar las muestras.

Procedimiento:

1. Seleccionar los especímenes (por lo menos 3), de geometría irregular o regular, cada uno debe pesar por lo menos 50 gr.
2. Se limpia para eliminar el polvo que se encuentre adherido a ella y luego se pesa determinando la masa de la muestra.
3. Se sumerge en el recipiente con agua por un periodo de por lo menos una hora agitándola periódicamente de manera que se remueva el aire atrapado en la roca.
4. La muestra se coloca en la canasta de inmersión y se determina la masa.
5. Se retira del baño de inmersión y se seca superficialmente con un paño húmedo.
6. Se pesa obteniendo la masa saturada.
7. La muestra se coloca dentro de un recipiente limpio y seco e introducido en el horno a una temperatura de 105°C .
8. Se seca por un día y luego se pesa la muestra obteniendo la masa del suelo.
9. Repetir todo el procedimiento para cada pedazo de la muestra.

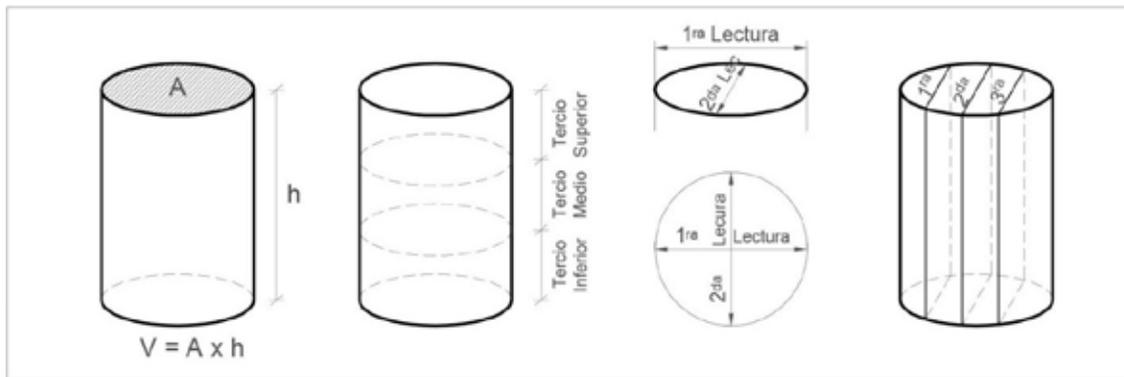


Figura 5 . Muestras para el ensayo.
Fuente: Autores

En las 3 lecturas sacamos un V promedio

$$V = \pi R^2 h$$

Ecuación 10 . Volumen de un cilindro

Cálculos:

M_w = masa de agua

M_s = masa del suelo

M = masa de la muestra

V_w = volumen de agua

V_s = volumen de suelo

V_v = volumen de vacíos

V = volumen de la muestra

ρ_w = densidad del agua

W₀ = peso seco del espécimen

$$\eta = \frac{V_v}{V} \times 100\%$$

n = porosidad

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w}$$

V = volumen del espécimen

$$\rho_d = \frac{W_0}{V}$$

ρ_d = densidad seca de la roca

Significado mecánico de la porosidad:

- Representa una disminución de la resistencia.
- Incrementa la deformabilidad del cuerpo.
- Indica un aspecto negativo como parte de una obra de ingeniería.

Permeabilidad

Es una de las propiedades más comunes en proyectos de ingeniería civil, para lo cual es necesario conocer el valor de k que es el coeficiente de permeabilidad de Darcy, y es la cantidad de agua unitaria que influye por área unitaria. (Figura 6 y 7)

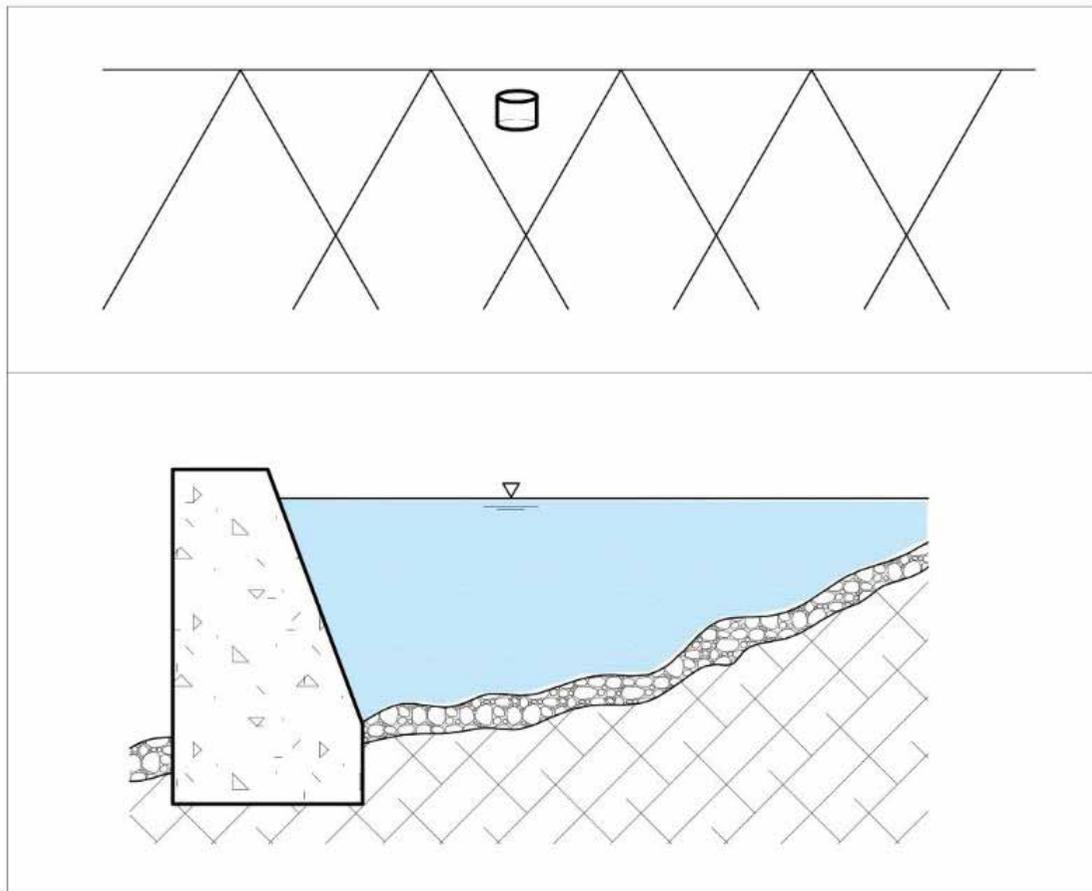


Figura 6. Permeabilidad.
Fuente: Autores

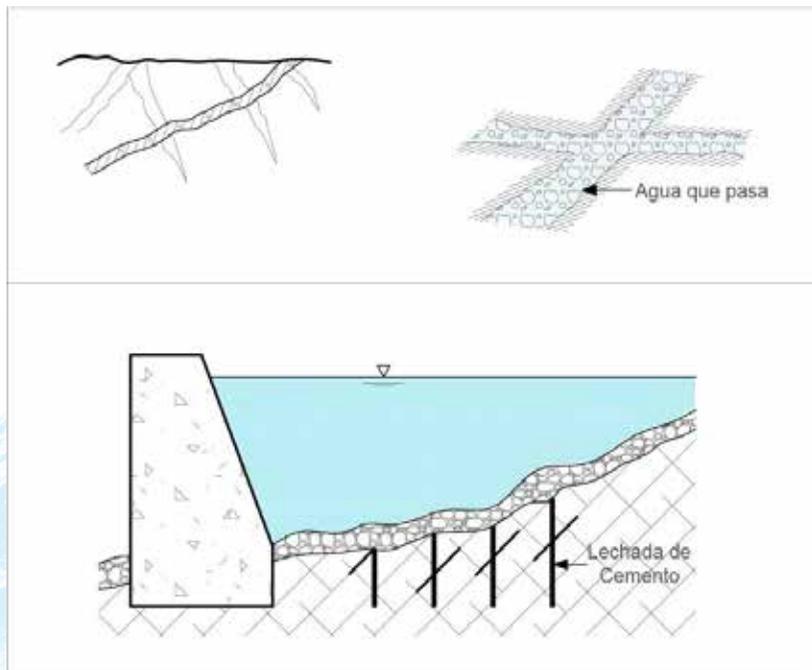


Figura 7. Permeabilidad.
Fuente: Autores

Caudal: cantidad de agua expresado en $\text{m}^3/\text{día}$ que fluye a través de una sección unitaria (área) y bajo una gradiente hidráulico unitario.

$$k = \frac{Q}{A \frac{dh}{dl}}$$

$Q = \text{Caudal } [L^3/T]$

$A = \text{Área } [L^2]$

$$Q = kA \frac{dh}{dl}$$

$\frac{dh}{dl} = \text{gradiente hidráulico (adimensional)}$

$K = \text{coeficiente de permeabilidad o coeficiente de Darcy, con dimensiones físicas de la velocidad}$

Ecuación 11. Ecuación de Darcy

La única posibilidad que existe para determinar k en rocas, es mediante la realización de ensayos de campo “ensayo INSITU”, como pruebas de bombeo en un medio idóneo.

Es prácticamente impermeable cuando: $K= 10^{-6} \text{ a } 10^{-9}$

Es un mal drenaje cuando: $K= 10^{-4} \text{ a } 10^{-6}$

Las rocas varían entre prácticamente impermeable a un mal drenaje $K= 10^{-2} \text{ a } 10^{-4}$

Las rocas generalmente tienen valores muy bajos para K con valores de: $K=10^{-4}$ a $k=10^{-7}$ [cm/s].

Tabla 6 Grado de permeabilidad de los suelos.

Tipo de suelo	Grado relativo de Permeabilidad	Coefficiente de Permeabilidad k (cm/seg)	Propiedades de drenaje
Grava Limpia	Alto	$10^2 \text{ a } 10^6$	Buena
Arena Limpia	Medio	$1 * 10^{-3}$	Buena
Grava arenosa	Medio	$1 * 10^{-3}$	Buena
Arena fina	Bajo	$10^{-3} \text{ a } 10^{-7}$	Franca pobre
Limos	Bajo	$10^{-3} \text{ a } 10^{-5}$	Franca a pobre
Arena limo arcilloso	Muy bajo	$1 * 10^{-4} \text{ a } 1 * 10^{-7}$	Pobre o prácticamente impermeable
Arcilla homogénea	Muy bajo a prácticamente impermeable	$< 1 * 10^{-7}$	Prácticamente impermeable

Fuente:(Badillo, 2005)

Inyección de consolidación: las inyecciones consisten en llenar artificialmente los espacios vacíos con una lechada de cemento y agua con lo cual se llenan; eliminando la posibilidad de que siga fluyendo agua. Es un trabajo especializado y costoso, fundamentalmente lo que se hace es construir una barrera en el subsuelo.

Se deberá definir:

- Distancia entre agujeros
- Distancia entre filas
- Profundidad de perforación

Las lechadas y las distancias entre agujeros, filas y profundidad dependen de la presión y el volumen del lechado o material de la inyección, el objetivo es suprimir los lóbulos e impermeabilizar las partes del terreno y luego se definirá las especificaciones técnicas.

Ensayo insitu para determinar la permeabilidad

Prueba de permeabilidad tipo Lugeon o Lugeon Clásico:

Las de mayor uso son las de *Lugeon* (Figura 8) a partir de la década de los 30. Consiste en inyectar agua bajo presión y medir las pérdidas, para la cual debemos procurar:

Las pruebas de permeabilidad se las realiza al mismo tiempo que las perforaciones

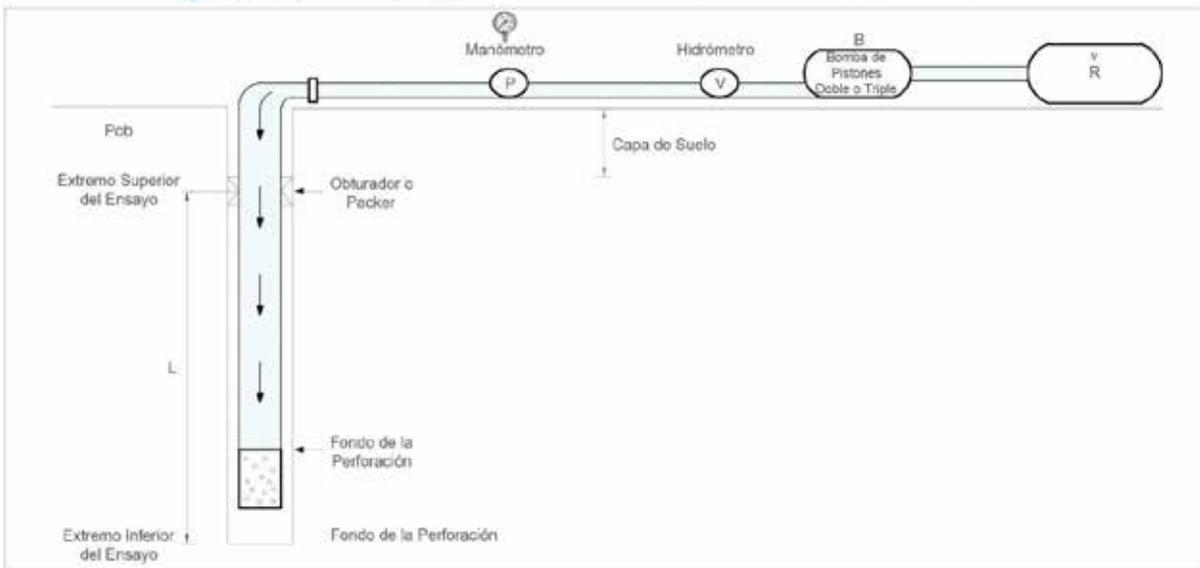


Figura 8. Prueba tipo Lugeon.
Fuente: Autores

Equipo:

El hidrómetro es un medidor de agua.

La bomba de presión se tendrá que mantener constante en una curva tiempo volumen.

El reservorio de agua, o un tanque de agua.

Obturador.

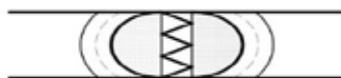


Figura 9. Obturador.
Fuente: Autores

Obturador o Parker: es un dispositivo que actúa como un corcho, está constituido por un tornillo rodeado por una membrana de caucho, se consigue formar un cuello que aísla el extremo del Parker para adentro y cumple un papel de sello hidráulico que se define los parámetros. (Figura 9)

L: se toma desde el centro del Parker hasta el fondo del agujero.

Los Parker vienen de diferentes longitudes: 60 cm, 1m, 1.5m

Pob: profundidad del obturador

h: la altura del manómetro, siempre tendrá la altura de un hombre a la vista: 1.60m o 1.65m

Procedimiento:

El ensayo consiste en inyectar agua a presión en ciclos que tienen duración de 10 minutos con una determinada presión; se puede medir el volumen o volúmenes con el manómetro, debe permitirse una medición directa con presión de 0.5 kg/cm², el manómetro se lo utiliza a partir de 2; este se toma como tiempo 0, el mismo tiempo que se aplasta un cronómetro, se toma una lectura inicial en el hidrómetro y seguirán una serie de dígitos.

Una vez terminado el tiempo de 10 minutos, se toma la lectura final. La lectura inicial y la final darán diferentes dígitos. El volumen será la diferencia entre los dígitos en algunos casos $L_f = L_i$, en este caso $V = 0$. Nunca L_i será mayor que L_f . $V = L_f - L_i$

Ciclos	(m)	(kg/lt)	Caudal		
1	10	2	Q1=	3	Q1/3m
2	10	5	Q2=	3	Q2/3m
3	10	10	Q3=	3	Q3/3m***
4	10	5	Q4=	3	Q4/3m
5	10	2	Q5=	3	Q5/3m

A Q1 se lo marca con unidades Lugeon y a éste se lo denomina:

1 Lugeon = 1 litro/minuto/metro

Se describe un caudal referido a una longitud, por tanto es una absorción en un espacio, siempre y cuando exista una presión de 10 kg/cm², se refiere indudablemente a la longitud del ensayo.

La longitud L es siempre predeterminado desde el inicio existente en cuanto a longitud: 2 absorciones 3 m y 10 m.

Por último tendremos la columna de unidades Lugeon y será el caudal sobre las m obtenidos, y se satisface en algún caso ***, aquí será el único caso en el que se hable con propiedad y presión que está en unidades Lugeon.

El fluido que se inyecta debe ser agua clara sin sustancias en suspensión, se debe acostumbrar a tener un par de hidrómetros de referencia. Los hidrómetros deben ser previamente calibrados en un laboratorio al igual que los manómetros y se deberá tener al menos uno de referencia. A los tubos se los debe revisar las roscas.

La permeabilidad de Lugeon es:

$$k=L \times T^{-1}$$

Ecuación 12. Permeabilidad

Causas pérdidas: las pérdidas son muy altas y evalúan la invalidez de evaluar por el coeficiente de Darcy.

Codo: cambio de dirección

Fricción: a lo largo del conducto

Restricciones en el orificio: roscas y uniones.

La presión tendrá 2 componentes:

P_E será la presión efectiva y será la presión manométrica, se la puede controlar, pero el factor que no se puede controlar es la columna hidrostática h, presión de la columna h, por ende, se la debe calcular. Se tiene 3 opciones (Figura 10):

$$P_E = P_M + H$$

Ecuación 13. Presión efectiva

$$H = longitud \times Pe \text{ de agua}$$

$$H = l \times \frac{F}{l^3}$$

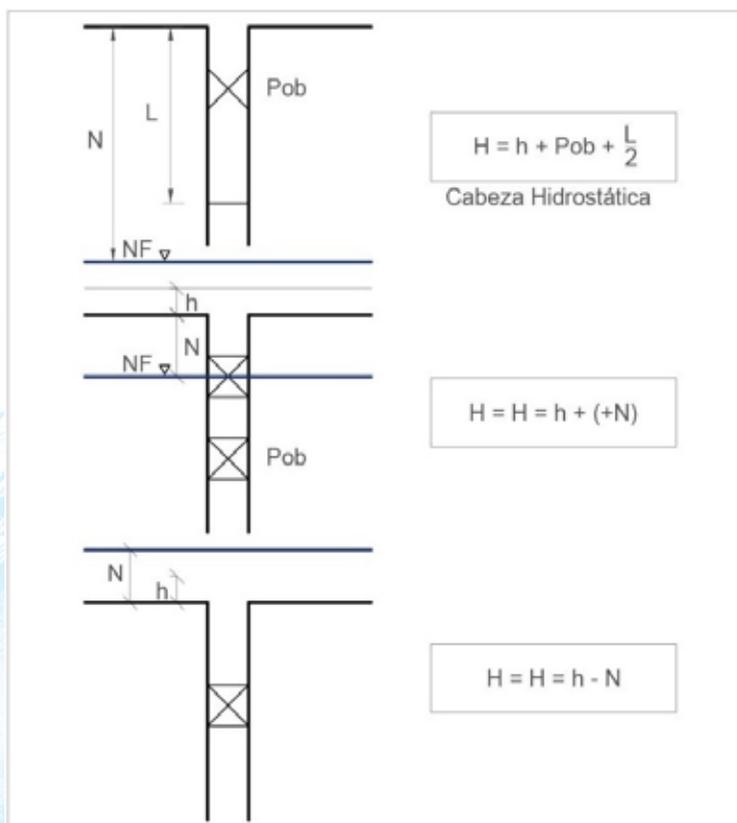


Figura 10. Componentes de la presión.
Fuente: Autores

Para poder realizar los cálculos de pruebas de Lugeon se considera que el cálculo se debe hacer en la mitad de la longitud.

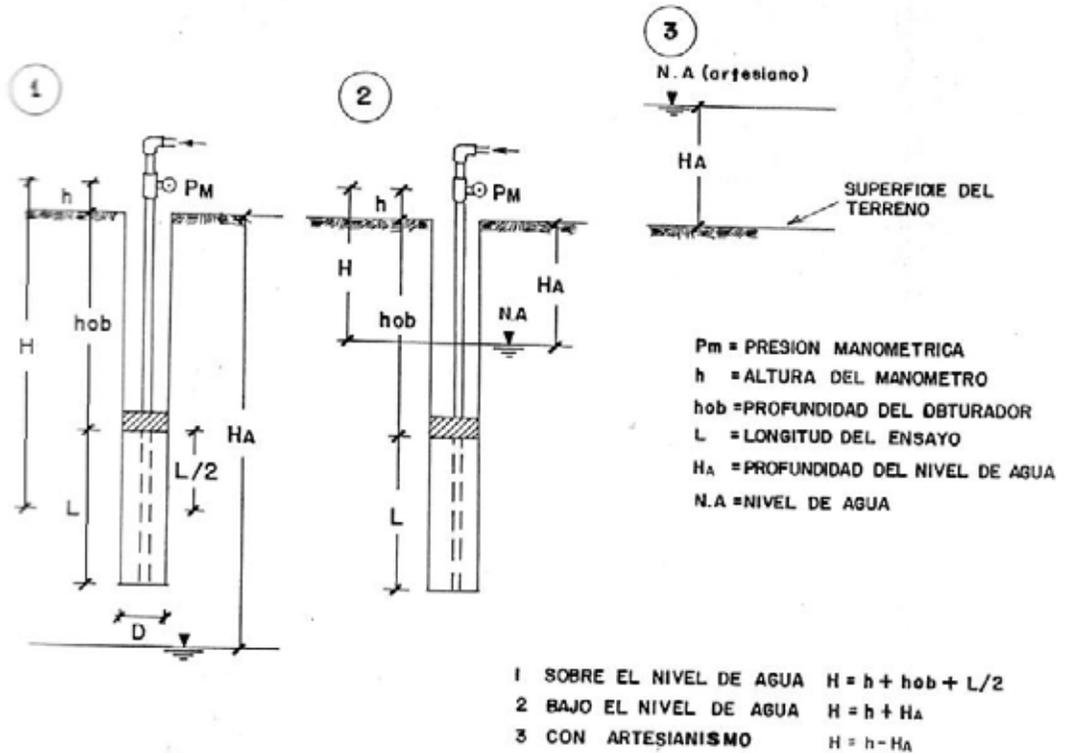
Ejemplo: Cortesía (Caminosca, 2009)

PRUEBA LUGEON

PAUTE MAZAR
GERENCIA MAZAR
 Fecha: 16-Sept-09
 Sondeo No: DRENES
 Cota: 2143
 Ensayo No: 1
 Prof. De (m): 12.00
 a (m): 15.00
 Long. Tubería: 12.50
 Radio sondeo (m): 0.038

PLINTO IZQUIERDO
SGF
 Inclinación R/H: 74.15
 Altura manómetro H_m (m): 1
 Longitud ensayo L (m): 3.00
 Profundidad del obturador H_{ob} (m): 12.00
 Nivel de agua (m): 10
 Altura de la columna de agua H_a (m): 10.62
 Carga hidráulica Ph (Kg/m²): 1.061980018
 Packer: Neumático

Presión Manóm. (Pm) kg/cm	Tiempo inyección (minutos)	Volumen inyectado (litros)
2.50	10.00	1.50
5.00	10.00	49.00
7.50	10.00	58.00
2.50	10.00	27.00
5.00	10.00	43.00



Fuente: Badillo, J. (2005)

Se trata de preservar la integridad del macizo.

La presión intermedia se calcula:

$$P_{int} = \frac{P_{max}}{2}$$

La presión mínima = carga hidrostática

$$P_{min} = H$$

Para la diferencia de volúmenes se utiliza el hidrómetro.

La longitud del ensayo puede ser 3 o 5 metros.

Las unidades Lugeon son el caudal para la longitud, pero se las debe homologar a 1.

También se las conoce como k expresada en unidades Lugeon.

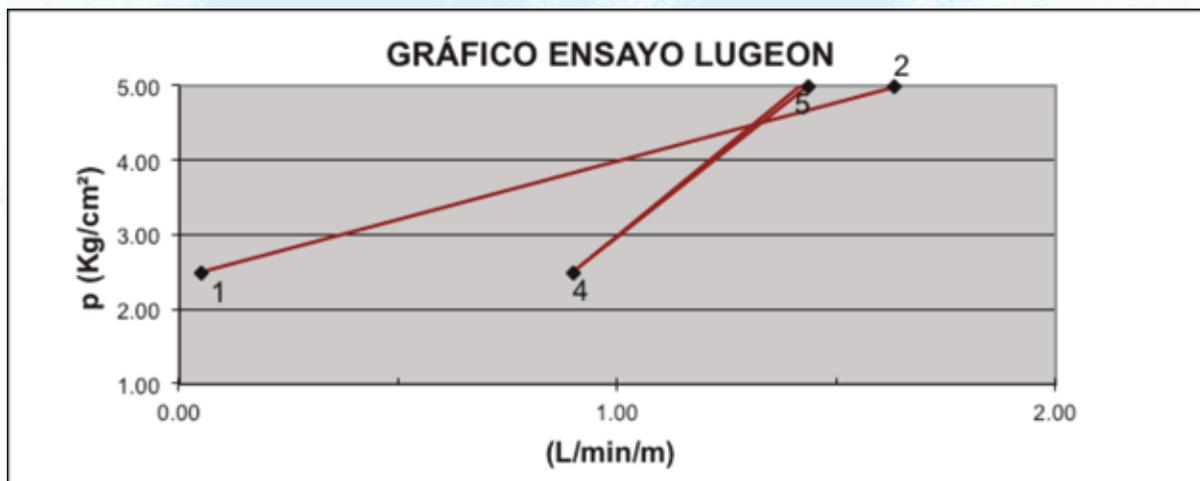
NOTAS:

1. Si el nivel de agua corresponde a un nivel artesiano, el valor debe ir con signo negativo.
2. Si el pozo es seco, colocar el valor de profundidad del pozo en el valor del nivel de agua

Cálculos:

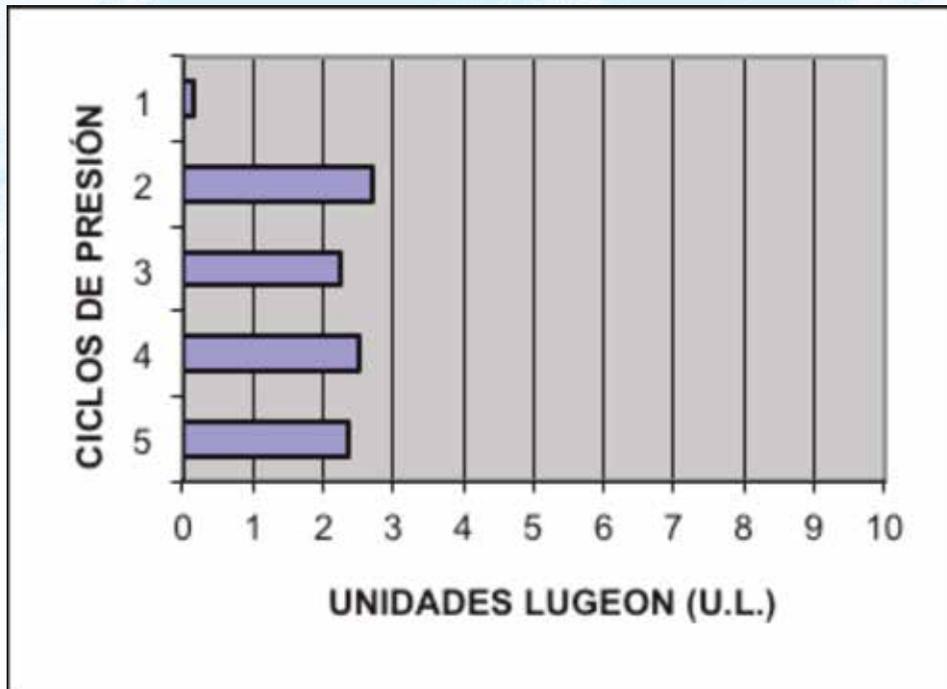
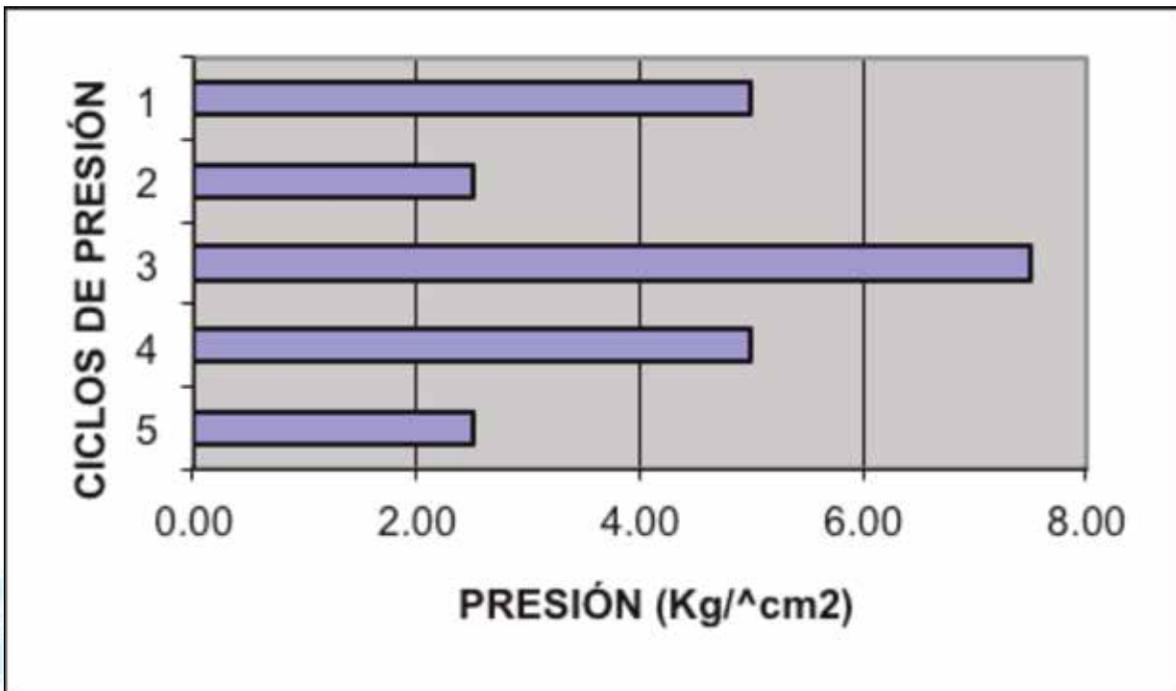
TUBERIA	Longitud (m):	12,50	MANGUERA	Longitud (m):	4
	Diámetro (m):	0,025		Diámetro (m):	0,025
	Coef. Rug. :	0,01		Coef. Rug. :	0,008

PÉRDIDA	P. MANO.	P. EFECTI.	CICLOS	TIEMPO	VOLUMEN	CAUDAL	CAUDAL	LUGEON	PERMEABILIDAD
H4	Po	P	DE	T	V	Q	Qo	Lu	K
(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	PRESION	(min)	(l)	(l/min)	(l/min/m)	(Lugeon)	(cm/seg)
0,00000	2,50	3,56	1	10,00	1,50	0,15	0,05	0,14	1,62E-06
0,00359	5,00	6,06	2	10,00	49,00	4,90	1,63	2,70	3,13E-05
0,00503	7,50	8,56	3	10,00	58,00	5,80	1,93	2,26	2,62E-05
0,00109	2,50	3,56	4	10,00	27,00	2,70	0,90	2,53	2,93E-05
0,00277	5,00	6,06	5	10,00	43,00	4,30	1,43	2,37	2,74E-05



CICLO	PRESIÓN	CICLO	U.L.
5	2,50	5	2,37
4	5,00	4	2,53
3	7,50	3	2,26
2	2,50	2	2,70
1	5,00	1	0,14

ANÁLISIS	U _{en}
Se produce un:	Flujo Laminar
Usar:	Promedio de Valores Lugeon
UL =	2
K =	2,32E-05



$$\frac{Q}{seg} * \frac{10}{P_{min}}$$

K_L representativas

- 1 Promedio de 5 valores
- 2 El de la presión máxima
- 3 El de la presión máxima y/o intermedio
- 4 El de la presión máxima
- 5 El del último ciclo

Caso 1

Cuando se inyecta agua, esta se absorbe por las fisuras en forma laminar sin que exista ninguna interferencia; es decir, existe una forma en la cual se presentan las juntas. (Figura 11)

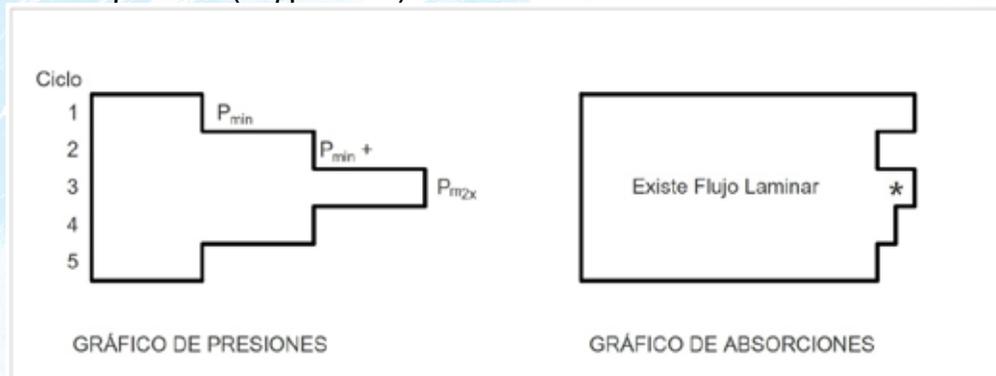


Figura 11. K_L representativas caso 1.

Fuente: Autores

Caso 2

Aquí se está en presencia de un flujo turbulento en el que se presentan cambio de comportamientos críticos. El valor representativo de Lugeon es el valor de la presión (P_3) y este valor corresponde a la mínima absorción. (Figura 12)

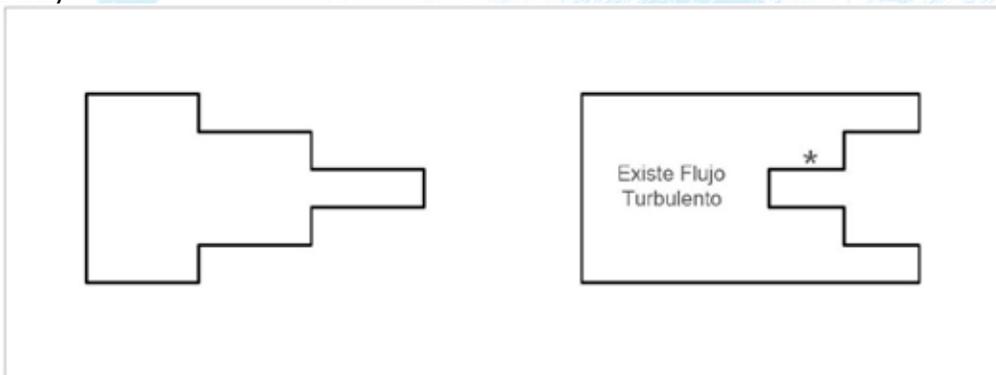


Figura 12. K_L representativas caso 2.

Fuente: Autores

Caso 3

Aquí se presencia la máxima absorción; corresponde a la máxima presión, la junta tiene un comportamiento de dilatación, el valor representativo es el de la presión mínima (y/o intermedia). (Figura 13)



Figura 13. KL representativas caso 3.
Fuente: Autores

Caso 4

La absorción crece paulatinamente. Este comportamiento se llama lavado. Es el lavado de los sólidos que rellenan la junta. La permeabilidad representativa es el de la presión máxima. (Figura 14)

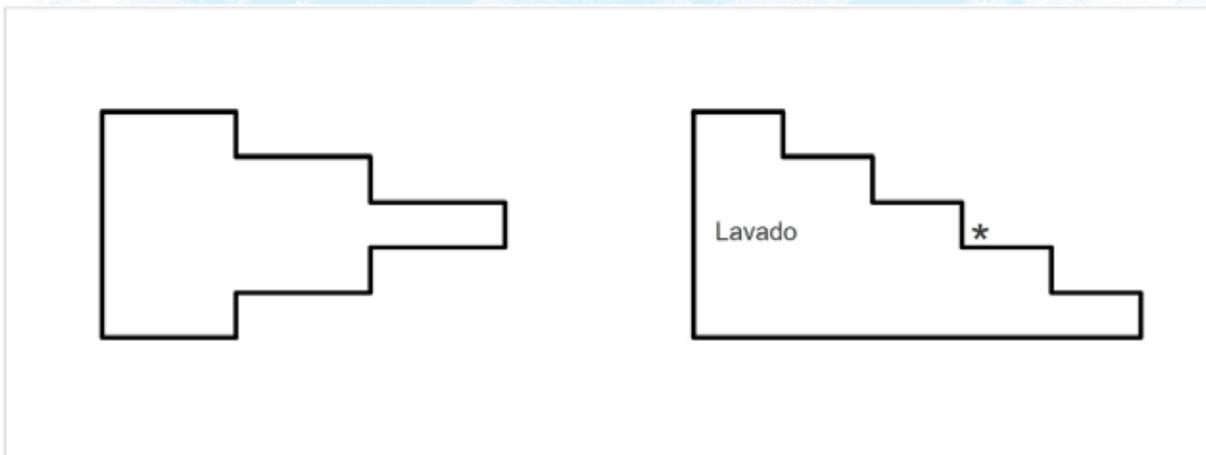


Figura 14. KL representativas caso 4.
Fuente: Autores

Caso 5

La junta se va destruyendo, sellando. La permeabilidad representativa es el sellado de juntas y es el último ciclo de presión. (Figura 15)

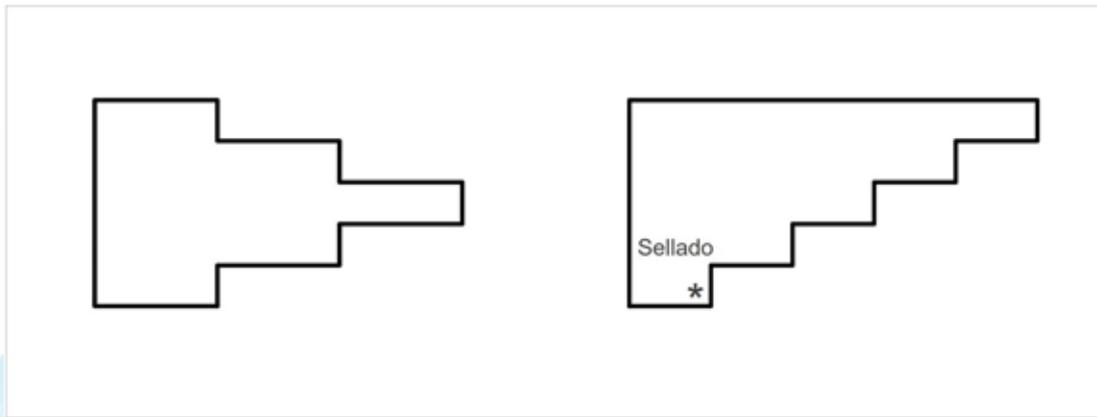


Figura 15. KL representativas caso 5.
Fuente: Autores

Es base a esto, se podría determinar el tipo de material y la calidad de meteorización. Para inyectar lechada se utiliza cementos con doble y triple lechada. Bentonita, polímeros.

A las pruebas de Lugeon no se les atribuye una permeabilidad; un valor práctico es:

1 Lugeon es igual a una permeabilidad, las inyecciones mayores deben ser inyectadas. 1×10^5 cm/s.

PROPIEDADES RESISTENTES

Resistencia a la compresión uniaxial

Es el máximo esfuerzo de compresión uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a la compresión simple, σ_c . La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es:

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

La metodología de ensayo es consistiendo de forma resumida en las siguientes operaciones:

1. Obtención de una muestra representativa del terreno (por lo general, correspondiente a una muestra inalterada tomada bien en sondeo, o bien por medios manuales en una cata o un afloramiento.)

2. Tallado cuidadoso de una probeta y refrentado (si procede) de las caras de misma que vayan a estar en contacto con los platos de la prensa. (Figura 16).
3. Rotura a compresión uniaxial, por lo general a velocidad (deformación axial) constante, tomando lecturas de la relación entre la deformación y el valor de la carga aplicada.

Esfuerzo unitario σ :

Es la fuerza aplicada por unidad de área

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 14. Esfuerzo normal

Compresión Uniaxial: tiene un solo eje de aplicación de la fuerza. (Figura 16). Esta propiedad física de las rocas es la que más frecuentemente se solicita su determinación ya que se pone a trabajar la roca a compresión simple.

En cimentaciones:

Resistencia a la compresión simple: Este es uno de los ensayos más rigurosos y por lo tanto una de las propiedades más confiables.

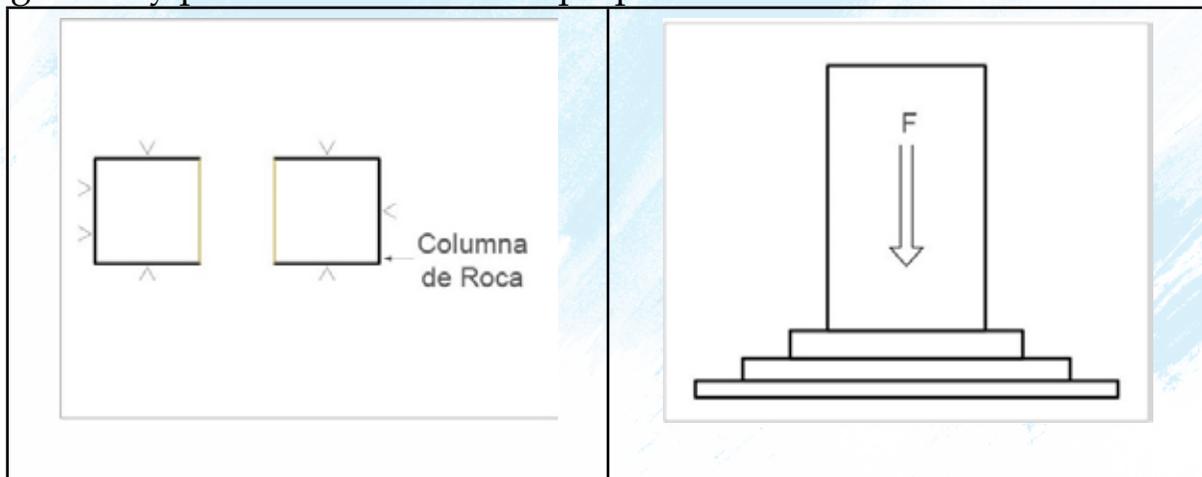


Figura 16. Columna de roca.
Fuente: Autores

Compresión: acorta las dimensiones físicas del espécimen.

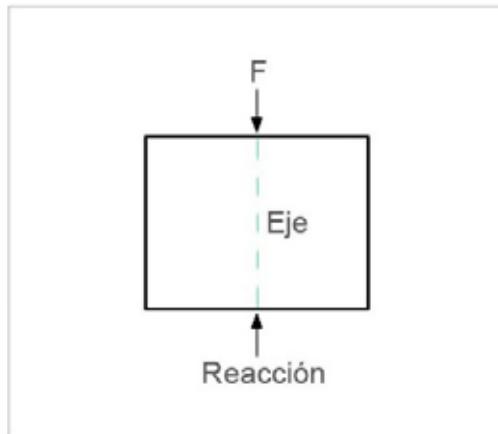


Figura 17. Compresión simple.
Fuente: Autores

Resistencia a la compresión simple:

Este es uno de los ensayos más rigurosos y por lo tanto una de las propiedades más confiables de las propiedades ingenieriles. En la mayor parte de las rocas la velocidad de carga apropiada 0,5 a 1 MPa/s, puede ser alterada ligeramente sin que produzcan variaciones en los resultados. Sin embargo, en las rocas evaporíticas: como la sal común y la silvinita, es conveniente realizar los ensayos con una velocidad de carga constante, dentro del rango mencionado, ya que presentan el fenómeno de fluencia y su resistencia depende en alto grado del tiempo que dure el ensayo.

Factores de los que depende la resistencia a la compresión simple:

1. La calidad de la roca (roca porfidítica)
2. Tamaño del grano (roca granítica)

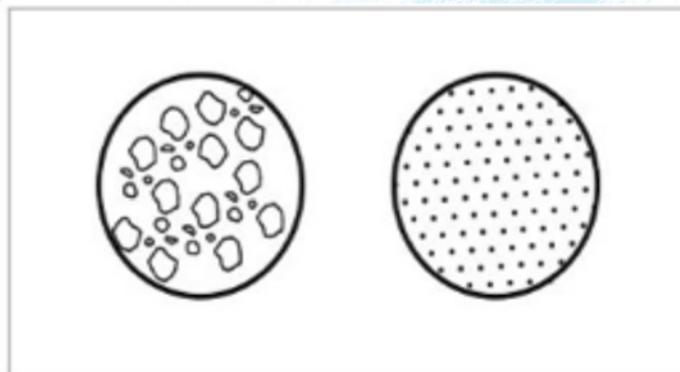


Figura 18. Tamaño de grano de las rocas.
Fuente: Autores

3. Tiene mayor resistencia mientras menor sea el tamaño del grano.
4. Peso específico γ de los componentes. Mientras mayor sea el peso específico, más resistente.
5. Clase de cemento (roca sedimentaria o matriz ígnea metamórfica): cemento silíceo, calcáreo, más resistente que el sílice.
6. Darcy, con la que se aplica la dureza o carga respecto de los planos de discontinuidades del macizo.

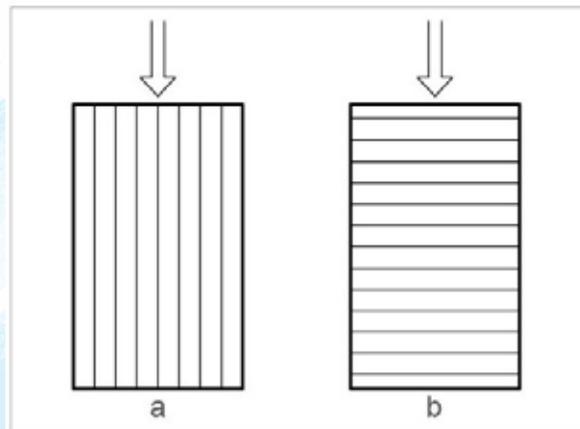


Figura 19. Resistencia respecto a planos de discontinuidades.
Fuente: Autores

Del gráfico (Figura 19) resiste mucho más B, debido a que actúa perpendicularmente a los planos de discontinuidades.

Anisotropía:

Un material es anisótropo cuando sus propiedades dependen de la orientación según la cual se hace la medición de ellas.

Además es un material no homogéneo (Teoría de la Elasticidad), se fundamenta en la resistencia de un material que es perfectamente homogéneo e isotrópico. Por lo que ya no se tendrá una base teórica. (Figura 20)

La Teoría de la Elasticidad para esfuerzos es: “a todo esfuerzo corresponde una deformación”

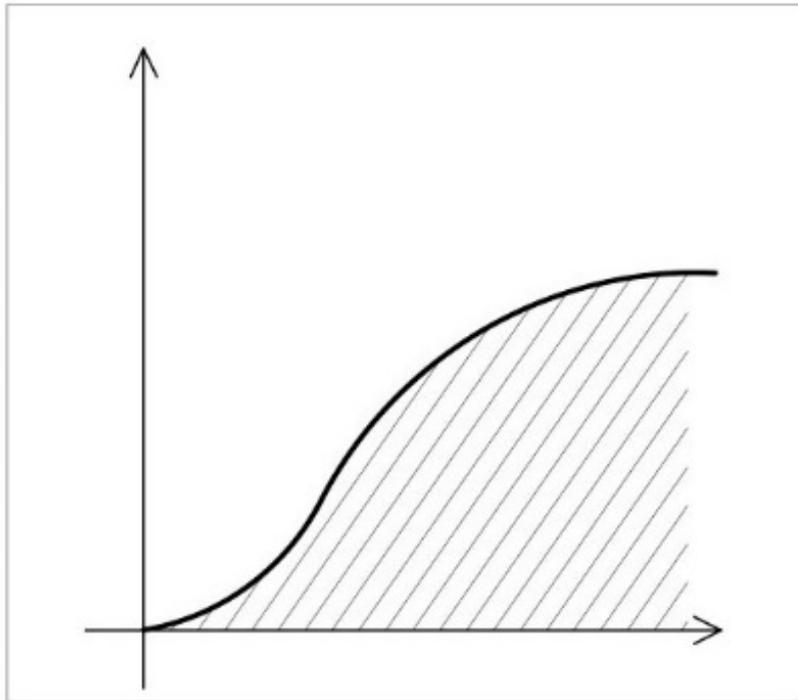


Figura 20. Ley de Hooke.
Fuente: Autores

Tipos de rotura:

En un ensayo de compresión simple se pueden producir distintos tipos de rotura como lo son:

1. Rotura frágil: predominan las grietas paralelas a la dirección de la carga, y la rotura ocurre de un modo brusco y bajo deformaciones muy pequeñas, presentándose después de ella un desmoronamiento de la resistencia.

2. Rotura dúctil: se deforma, sin que aparezcan zonas de discontinuidad en ella, la rotura se la observa a través de un plano inclinado.

Método de laboratorio para determinar el valor numérico de la resistencia uniaxial para una muestra (ROCA)

Norma: ISRM Suggested Method for Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials.

Proceder a comprimir una probeta de roca que cumpla con la norma, en forma no confinada, para determinar la resistencia a la compresión no confinada. Es un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia.

En este ensayo se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Razón Largo/ Ancho de la probeta debe ser 2.5 a 3.0:1
- Extremos deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- Ancho de muestra debe ser >10 veces el tamaño medio del grano.

Equipo:

- Máquina o prensa de compresión
- Pie de metro
- Discos metálicos, se coloca entre las platinas y el cuerpo. (Figura 21)

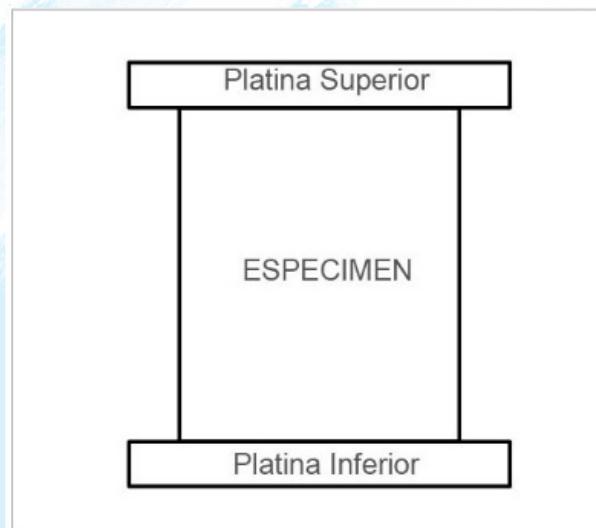


Figura 21. Cilindro de muestra.
Fuente: Autores

Procedimiento:

Debemos medir las dimensiones de la probeta con el pie de metro.

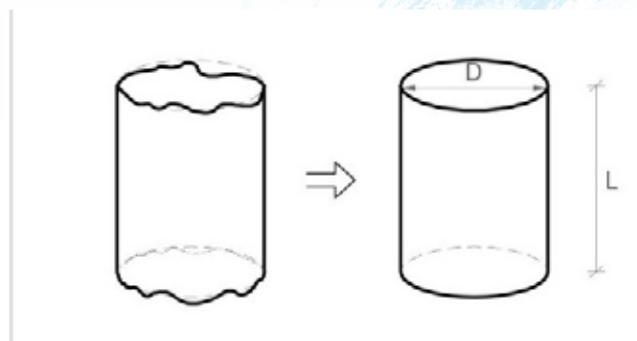


Figura 22. Forma de la muestra.
Fuente: Autores

Darle forma a la muestra:

- Cualquier cambio en la relación de esbeltez trae condiciones diferentes, el diámetro del espécimen debe mantener una relación con el tamaño más grande de los granos. (Figura 22)
- Las caras de los granos deben cortarse perpendicular al eje longitudinal y paralelos entre sí. (Figura 23)

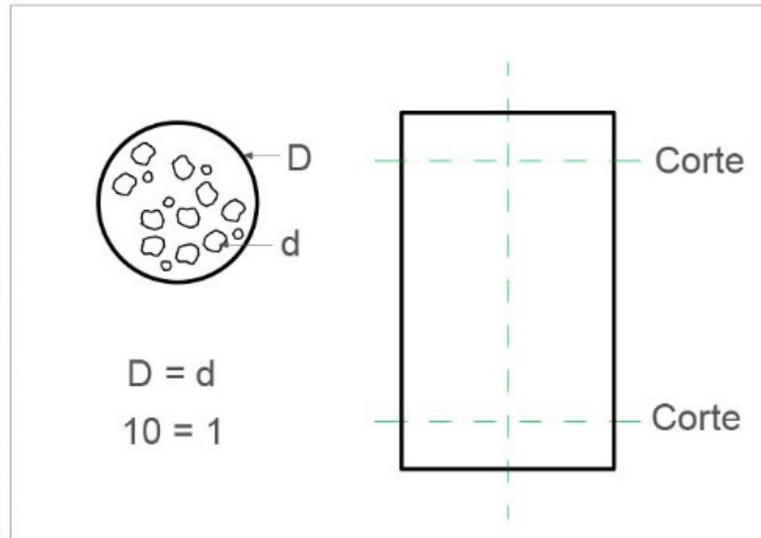


Figura 23. Partículas de la muestra.
Fuente: Autores

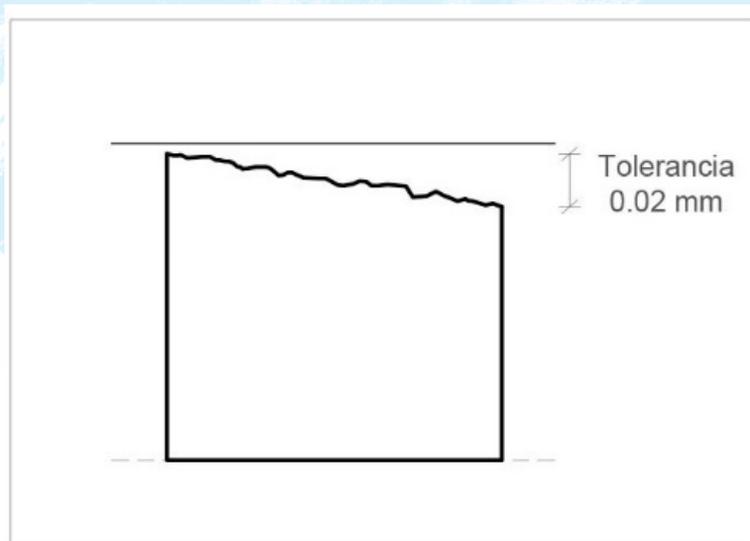


Figura 24. Tolerancia de bordes.
Fuente: Autores

- Los extremos de los especímenes deben ser horizontales con una tolerancia de 2 centésimas de milímetro. (Figura 24)
- La perpendicularidad de los extremos con respecto al eje longitudinal debe tener una tolerancia máxima de 0.01 medibles, que significa 5 centésimas de milímetro en 50mm de longitud.
- Las caras laterales deben ser rectas y pulidas, libres de irregularidades con una tolerancia de 0.3mm
- En el caso de muestras rocosas no se puede utilizar el *capping*, para alisar la roca, solo se debe pulir las superficies.
- *Capping*: material compuesto de ladrillo molido con azufre (pasta). Se pone en el extremo del cilindro de hormigón para eliminar asperezas y luego se hace el ensayo. (Figura 25)

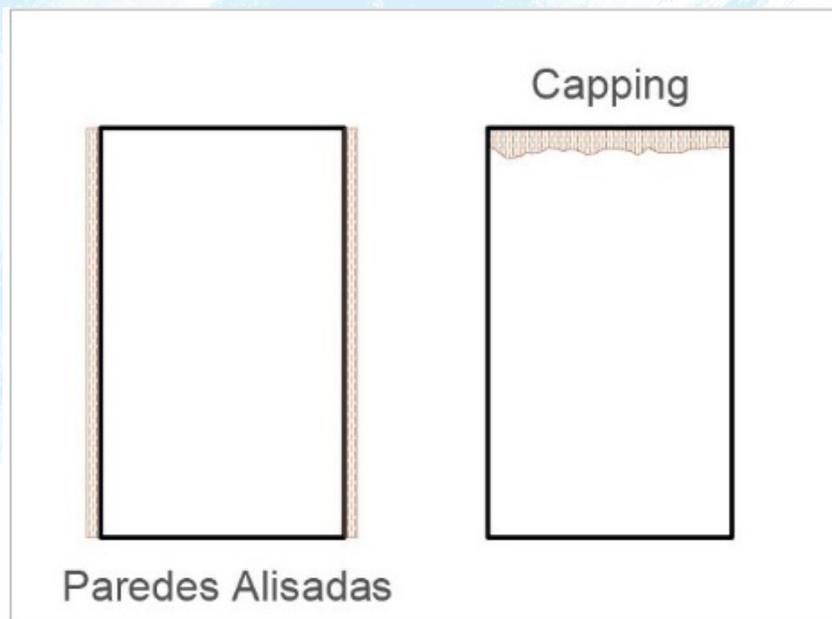


Figura 25. Capping.
Fuente: Autores

- El diámetro del espécimen debe medirse con una precisión de 0.01mm, la lectura con precisión de 1mm
- Los especímenes no bene guardarse por más de 30 días para salvaguardar la humedad.
- Antes de realizar el ensayo los especímenes deben permanecer 5-6 días en un ambiente de humedad con el 50% y a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

2. Instalar la probeta lo más centrada con respecto a las piezas que la compriman.
3. Accionar la manilla de cierre del sistema hidráulico.
4. Muchos tipos de roca fallan por compresión de manera violenta. Una malla protectora se coloca alrededor del testigo para prevenir posibles daños al volar los fragmentos de roca.
5. El incremento de cargas aplicadas será de 0.7 o 70 kgf/cm².
6. Regular la velocidad de carga, la cual debe ser continua y constante hasta la ruptura o falla de la probeta, el ensayo debe durar entre 5 a 10 minutos.
7. Anotar la carga máxima aplicada.
8. Observar, anotar y describir el tipo de ruptura observada. (Figura 26)
9. El número de especímenes de ensayo se los determina a través de las condiciones prácticas. Se deben ensayar por lo menos 5 especímenes.

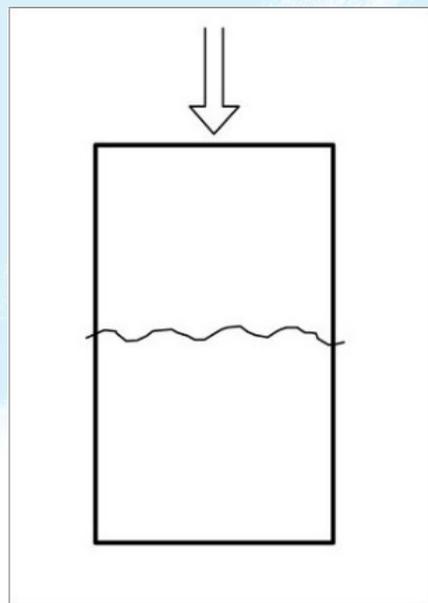


Figura 26. Especímen.
Fuente: Autores

Cálculos:

El esfuerzo de compresión se obtiene dividiendo la máxima carga aplicada sobre la muestra durante el ensayo entre el área de la sección circular del testigo expresado en kgf/cm² o KPa. Si la relación (L/D) es menor que 2 se hace una corrección al esfuerzo:

$$C = \frac{Ca}{0.88 + \left(\frac{0.24b}{h}\right)}$$

Ecuación 15. Corrección al esfuerzo

- C = resistencia corregida
- Ca = resistencia última
- b = diámetro del testigo (muestra)
- h = altura del testigo

Ejemplo:

Datos

$$Ca = 1267,89 \text{ kgf/cm}^2$$

$$b = 50,6\text{mm}$$

$$h = 13,46\text{mm}$$

$$C = \frac{1267,89 \text{ kgf/cm}^2}{0.88 + \left(\frac{0.24 * 50,6\text{mm}}{13,46\text{mm}}\right)}$$

$$C = 711,41 \text{ kgf/cm}^2$$

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es el máximo esfuerzo tensional de tracción por unidad de área que puede desarrollar un espécimen de roca a una fuerza.

Una roca trabaja a tracción (mala) en excavaciones, se liberan esfuerzos y se producen deformaciones. Esas tracciones producen fracturas, si no hay un soporte el techo colapsa. (Figura 27)

En el caso de una viga, ésta trabaja a Flexión. (Figura 28)

Tensión máxima

La tensión máxima o tensión de rotura, es el cociente entre la carga máxima resistida por la probeta antes de romper y la superficie inicial sobre la que actúa dicha fuerza.

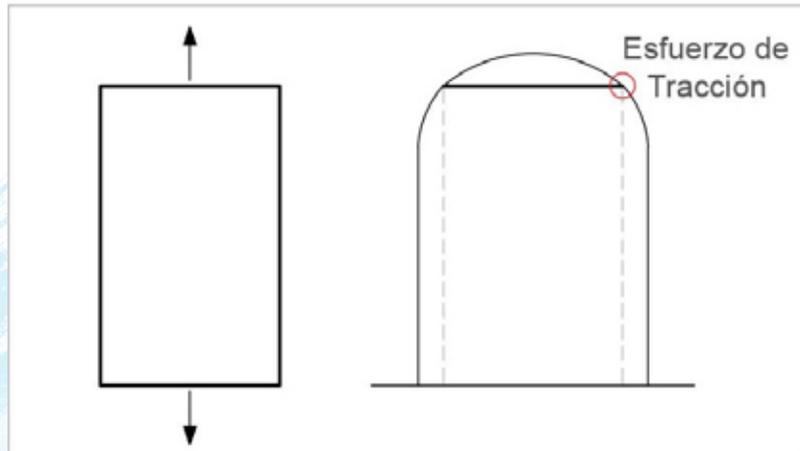


Figura 27. Esfuerzo de tracción.
Fuente: Autores

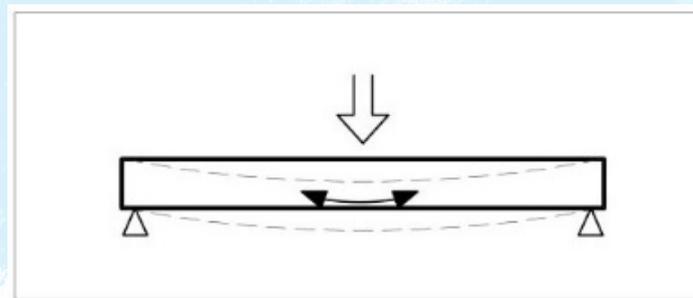


Figura 28. Flexión.
Fuente: Autores

Método de laboratorio para determinar el valor numérico de la resistencia a la tracción para una muestra (ROCA)

Método directo

Norma: ASTM D 2936-95

La roca es mucho más débil en tensión que en compresión, por lo tanto, en la determinación de la condición de fallo de una estructura de roca, muchos investigadores emplean resistencia a la tracción del componente roca como la resistencia a la ruptura de la estructura. (Figura 29)

La tracción directa es la prueba más básica para la determinación de la resistencia a la tracción de la roca. (Figura 30)

Con un espécimen de roca, se le pega cabezales metálicos en donde se insertan cables para realizar tracción y se cuantifica su resistencia.

No es muy práctico, pues es difícil aislar las torsiones que darán corte. Fallan por corte, no por tracción.

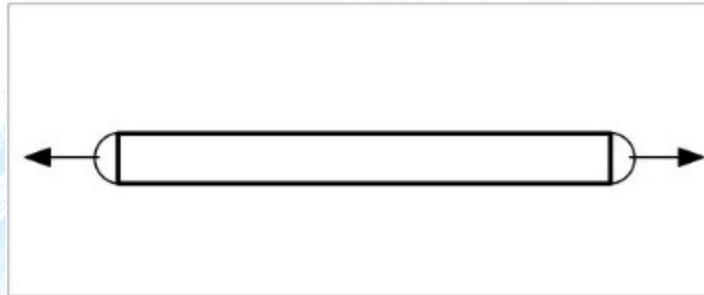


Figura 29. Tracción.
Fuente: Autores

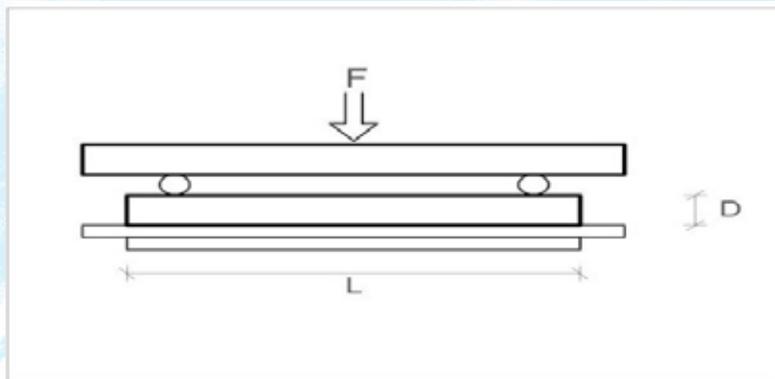


Figura 30. Tracción Directa.
Fuente: Autores

Equipo:

- Una prensa de carga, para aplicar y medir la carga axial sobre el espécimen, con una capacidad suficiente para aplicar la carga a una velocidad adecuada.
- Cabezales metálicos deben tener un espesor máximo de 1,5mm.

Preparación de espécimen:

- Las muestras de ensayo serán los cilindros circulares que puede tener grado de plenitud y suavidad de los extremos crítica.

- La muestra tendrá una relación de longitud a diámetro (L/D) de 2.0 a 2.5 y un diámetro no inferior a 17/8 pulg. (47mm). El diámetro del espécimen debe ser por lo menos 10 veces mayor que el grano más grande del mineral que forma la roca. Un diámetro de 4.92 cm por lo general satisface este criterio. Cuando el diámetro es menor que el indicado y se deben ensayar pues no hay disponibilidad de material, se debe anotar este hecho en el informe

Procedimiento:

1. Cimentar las tapas de metal de la muestra de ensayo para garantizarla alineación de la tapa de ejes con el eje.
2. Aplicar la carga de tracción de forma continua y sin shock.
3. Se aplica la carga o deformación a una aproximada velocidad constante tal que la falta ocurrirá en no menos de cinco y no más de 15 min.
4. Mantenga un registro de la carga máxima realizado por la muestra durante el ensayo.
5. Descartar los resultados de esas pruebas en las que se produce el fracaso ya sea parcial o totalmente.

Cálculo:

El cálculo de la resistencia a la tracción de la roca es mediante la división del carga máxima soportada por la muestra durante el ensayo por el área de sección transversal; con una precisión de 35,0 kPa (5 psi).

F= Carga de tracción aplicada al espécimen hasta la rotura.

A= Área de la sección transversal del espécimen.

$$\tau_T = \frac{F}{A}$$

Ecuación 16. Resistencia a la tracción

Método indirecto

Norma: ASTM D3967

Este ensayo tiene por objetivo determinar el esfuerzo de tracción de una roca aplicando una carga lineal de compresión sobre un diámetro del disco de roca a ensayar. El resultado de este esfuerzo de compresión es una tensión horizontal y un esfuerzo de compresión vertical variable.

Los esfuerzos compresivos toma valores máximos, y esto puede ocasionar en la mayoría de los casos a una fractura local, esta fractura se reduce empleando especímenes con relación espesor/ diámetro de 0.5 y colocando un apoyo adicional entre la roca y los bloques de máquina en los puntos de carga.

La fractura inicial producida sobre el espécimen nos dará como resultado el esfuerzo de tracción que ocurre en el centro del disco.

Equipo:

- Una prensa de cargas que puede aplicar y medir la diametral sobre el espécimen, con una capacidad de 100 toneladas.
- Apoyos suplementarios, estos apoyos pueden ser pedazos de cartón grueso (0.01D de espesor).

Preparación de la muestra:

- Los especímenes deben ser discos circulares con una relación espesor/ diámetro entre 0.5 y 0.75.
- El diámetro del testigo debe ser por lo menos 10 veces mayor que el grano más grande del mineral que forma la roca. Un diámetro de 4.92 cm por lo general satisface este criterio.
- Cuando el diámetro es menor que el indicado y se deben ensayar pues no hay disponibilidad de material, se debe anotar este hecho en el informe.
- Se determinará el diámetro del testigo con una aproximación de 0.1 mm. Se tomará tres medidas y obtendrá el promedio. Una de las medidas debe ser tomada en el diámetro que se va ensayar.
- Se determinará el espesor del disco con aproximación de 0.1 mm. Se tomará tres medidas y obtendrá el promedio. Una de las medidas debe ser tomada en el eje del disco.

Procedimiento:

1. Se aplica a una probeta cilíndrica (disco de roca o mineral) una carga lineal compresiva actuando a lo largo de su diámetro.
2. El resultado de este esfuerzo compresivo es una tensión horizontal y un esfuerzo compresivo variable.
3. La probeta rocosa o mineral se suele romper en la mayoría de los casos separándose en dos mitades según el eje de carga diametral.

Cálculos:

La probeta rocosa al ser ensayada debe tener la siguiente relación: $L/D= 0.5$
donde:

L= Longitud de la probeta (cm).

D= Diámetro de la probeta (cm).

τ_T = Resistencia a la tracción indirecta de la roca en (Kg/cm²)

P= Carga última de rotura de la probeta (Kg).

$$\tau_T = \frac{2P}{\pi DL}$$

Ecuación 17. Resistencia a la tracción indirecta

Resistencia a la compresión confinada (TRIAXIAL). Resistencia al corte



Figura 31.
Fuente: Autores

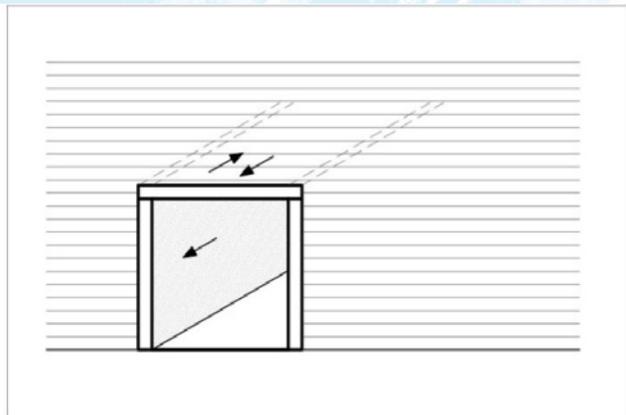


Figura 32. Esquema de falla
Fuente: Autores

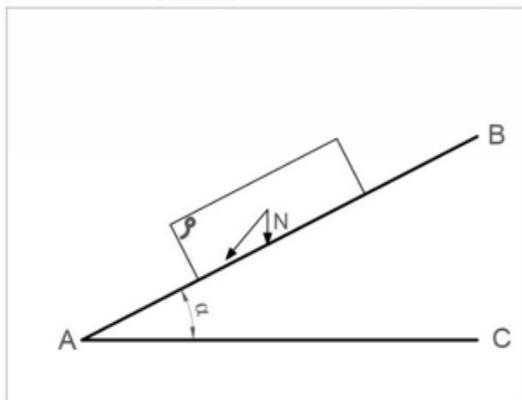


Figura 33.
Fuente: Autores

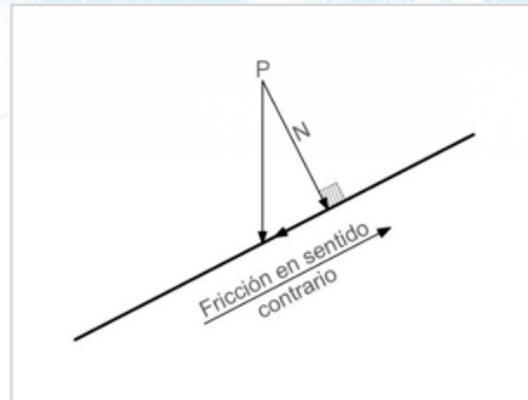


Figura 34. Esquema de falla
Fuente: Autores

$F_s = R/T$ se tiene fallas de corte

F_s = factor de seguridad

N = normal

R = rozamiento

T = fuerza de caída tangencial.

La tectónica se produce por falla transversal

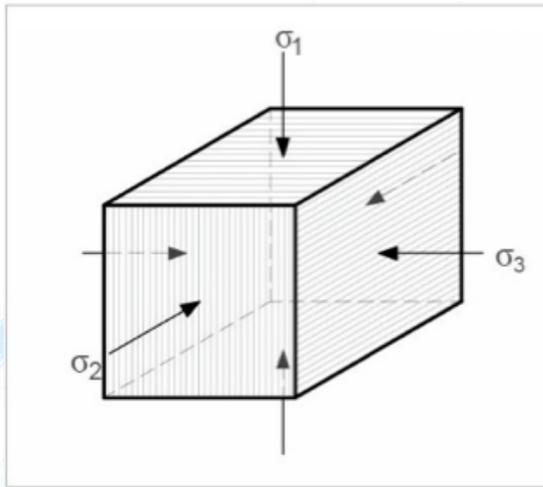


Figura 33.
Fuente: Autores

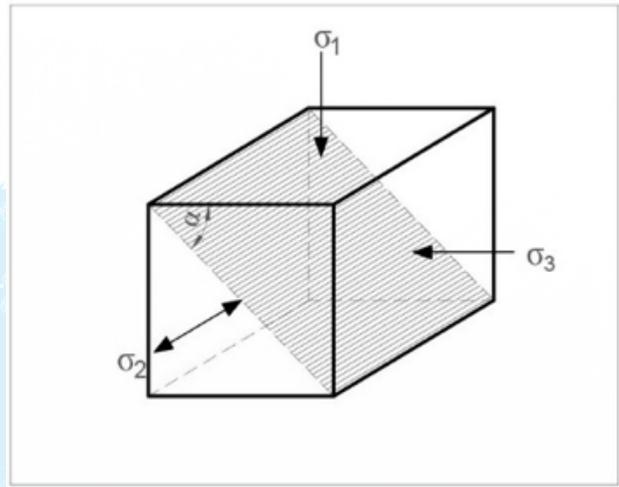


Figura 34. Esquema de falla
Fuente: Autores

Esfuerzos principales son aquellos que no tiene componente tangencial.	Esfuerzo principal mayor y tiene su plano principal Esfuerzo principal intermedio y tiene su plano principal
Son componentes tangenciales	Esfuerzo principal menor y tiene su plano principal

Se puede resolver mediante el método denominado círculo menos, aplicando coordenadas cartesianas planas.

Esfuerzo principal no tiene componente tangencial, es un esfuerzo normal a cada esfuerzo principal, corresponde un plano principal. (Figura 35)

La resistencia al corte y resistencia a la compresión confinada van ligadas con las siguientes condiciones.

El ángulo formado por el plano y el plano principal σ_1 , es perpendicular al plano σ_2 , siendo σ_2 paralelo al plano y se eliminan. Entonces solo queda dos esfuerzos (σ_1, σ_3) actuando; el problema es determinar la relación que existe entre los 3 esfuerzos, actuando sobre el plano, esto se resuelve mediante el círculo de Mohr. (Figura 36)

Círculo de Mohr:

Se encuentra en coordenadas cartesianas planas (no hay σ_2). Consiste en construir un semicírculo definido por un centro. (Figura 37)

Coordenada

$$X = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

Ecuación 18. Coordenadas en X del Círculo de Mohr

$$C = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Ecuación 19. Centro del Círculo de Mohr

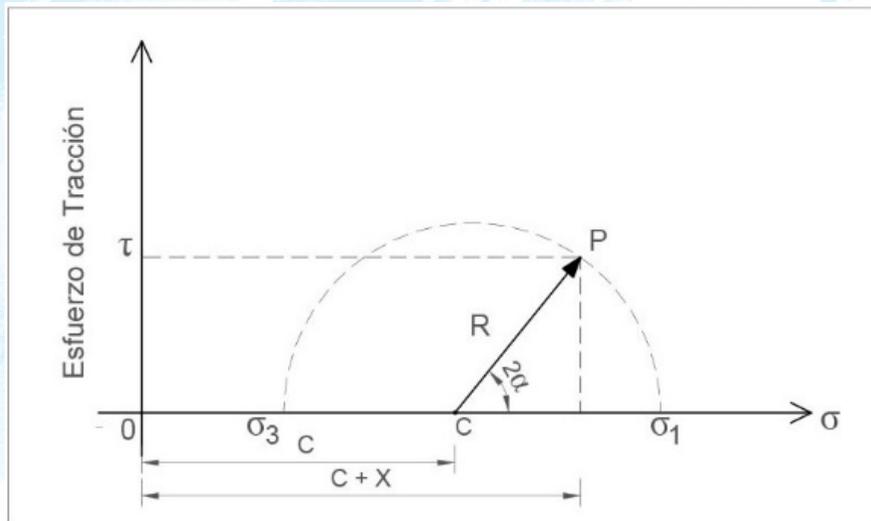


Figura 37. Círculo de Mohr.
Fuente: Terzaghi K. (1943)

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} ; 0$$

Ecuación 20. Radio del círculo de Mohr

$$C = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\alpha)$$

Ecuación 21. Componente cartesiano en el plano XY

Esfuerzo sobre un plano inclinado

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \operatorname{sen}(2\alpha)$$

Ecuación 22. Componente cartesiano en el plano XY

Ejercicio

$$\sigma_1 = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\tau = ?$$

$$\sigma = ?$$

$$\tau = \frac{10 - 2}{2} \operatorname{sen}(60)$$

$$\tau = 3.46 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = \frac{10 + 2}{2} \cos(60)$$

$$\sigma = 8 \text{ kg/cm}^2$$

Para resolver problemas de esfuerzos combinados se realizan varios círculos σ_1 , σ_3 , luego se trazan tangentes envolventes en los puntos de tangencia.

Se van incrementando σ_1 , σ_3

La pendiente de la recta ϕ es el ángulo de fricción. La coordenada con el eje de las X, es decir cuando tiene una compresión = 0, se llama cohesión. Esto se utiliza mucho en el caso de suelos, para el caso de rocas es muy difícil de realizar ya que se necesitan cubos de 1m³ y cargas muy grandes. (Figura 38)

Se puede resolver problemas de corte, resistencia a la compresión, esfuerzos normales, esfuerzos tangenciales. (Figura 39)

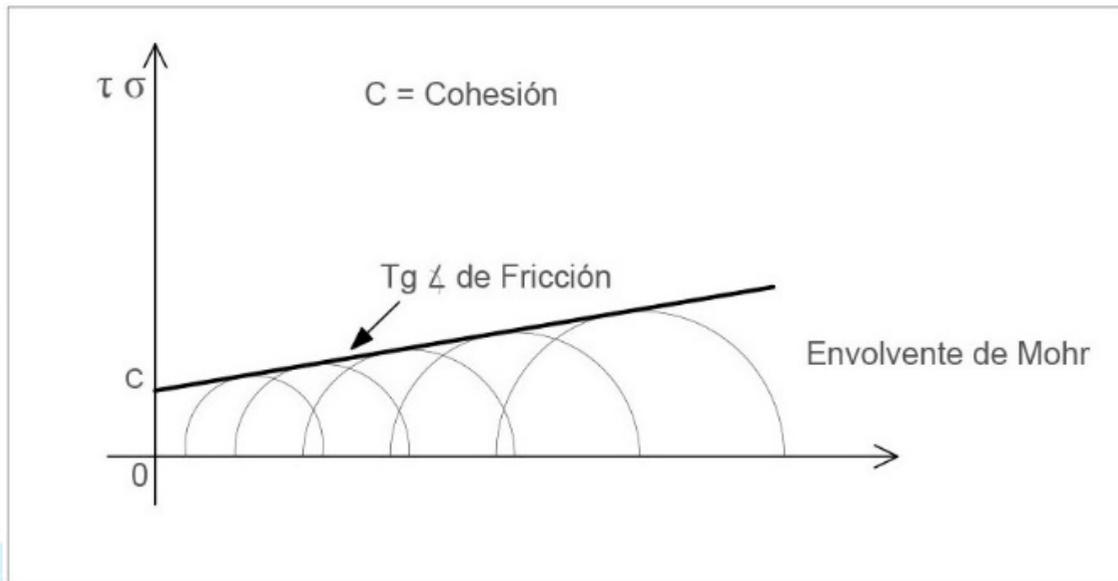


Figura 38. Envolvente de Mohr.
Fuente: Terzaghi K. (1943)

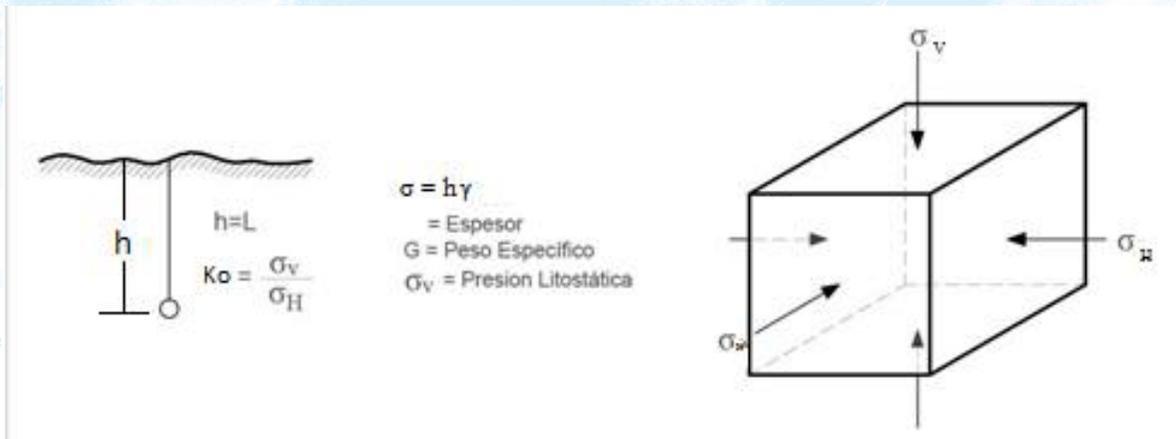


Figura 39. Estado de esfuerzos.
Fuente: Terzaghi K. (1943)

k_0 = coeficiente de concentración de esfuerzos

Según la teoría elástica el esfuerzo horizontal σ_h sobre esfuerzo vertical σ_v según Poisson es:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{u}{1 - u}$$

Ecuación 23. Relación del esfuerzo horizontal sobre el esfuerzo vertical, teoría de la elasticidad

En estado de reposo

$$\sigma_h = k_o * \sigma_v$$

Ecuación 24. Esfuerzo horizontal

La fracción cuando

$$u=0.20, \sigma_h=0.25\sigma_v$$

$$u=0.30, \sigma_h=0.43\sigma_v$$

Los esfuerzos a los que está sujeta la corteza terrestre son:

- Compresión: tectónica, compresión de fallas inversas $\sigma_h \gg \sigma_v$; $K_o \gg 1$
- Distensión: tectónica distensiva, falla normal $\sigma_h \ll \sigma_v$; $K_o < 1$

La experiencia demuestra que hasta $1B$ existe distribución de los esfuerzos, a $2.5B$ ya no existen esfuerzos ya que no afectan los mismos. (Figura 40)

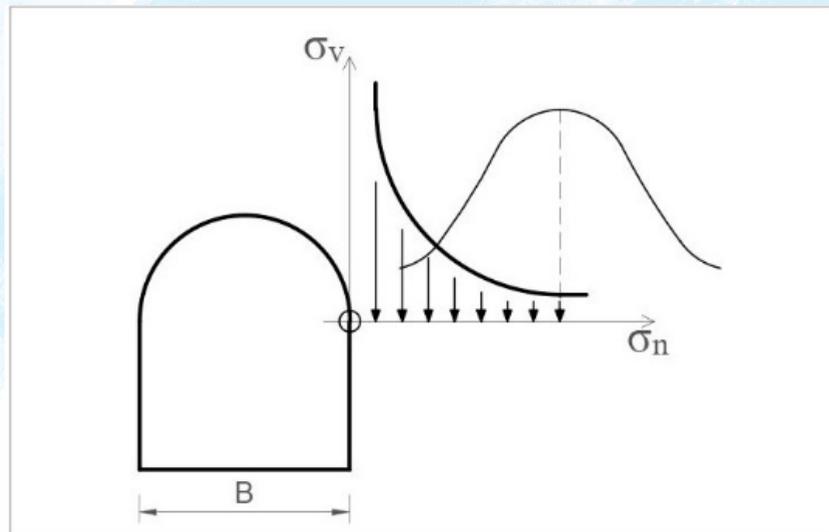


Figura 40. Esfuerzos de la corteza terrestre.

Fuente: Terzaghi K. (1943)

Ejercicio:

Calcular el esfuerzo vertical de una roca a una profundidad de 600 metros

$$h=600\text{m}$$

$$G=2.25 \text{ t/m}^3$$

$$\sigma_v = ?$$

$$\sigma_v = \sigma' * h_z$$

$$\sigma_v = 600 \times 2.5$$

$$\sigma_v = 1350 \frac{t}{m^3}$$

$$\sigma_v = 135 \text{ kg/cm}^2$$

RESISTENCIA AL CORTE (ENSAYO DE CORTE DIRECTO)

El ensayo de corte directo tiene como finalidad encontrar el valor del ángulo de fricción residual (ϕ_r) en especímenes de roca que han sido previamente fracturados. Este ensayo se puede aplicar en rocas duras o blandas y en rocas que contengan planos de falla o discontinuidades naturales o artificiales (interfase concreto-roca). (Figura 41)

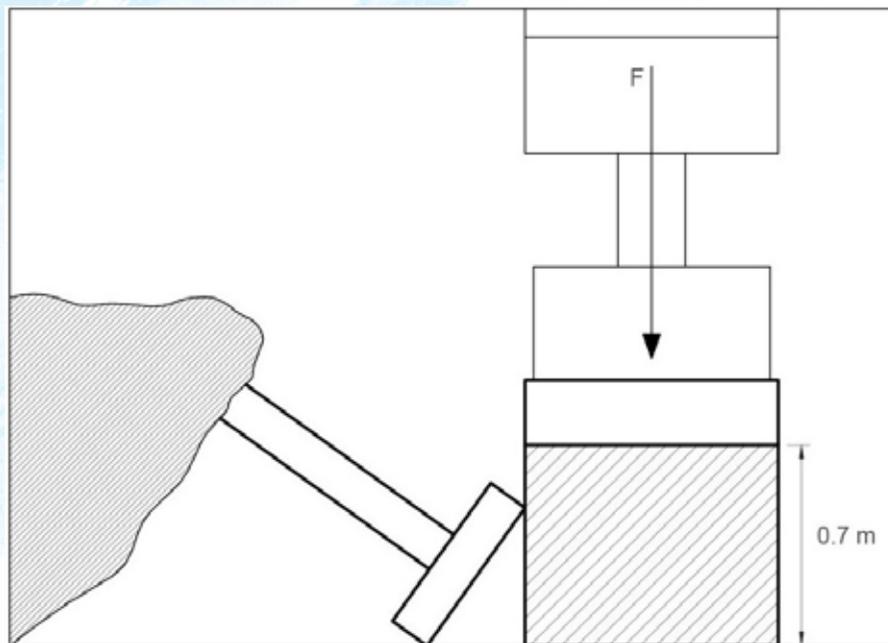


Figura 41. Corte directo.
Fuente: Autores

Ángulo de fricción interna: actúa mientras la roca no ha fallado.

Ángulo de fricción residual: actúa cuando se ha producido la falla.

La discontinuidad es absolutamente planar, no tiene ondulaciones ni rugosidades y la sometemos a un esfuerzo normal (σ), aplicado perpendicularmente a su superficie y a un esfuerzo cortante (τ) suficiente para causar un desplazamiento (δ). Entonces obtendremos el gráfico Esfuerzo cortante vs. Desplazamiento cortante. (Figura 42)

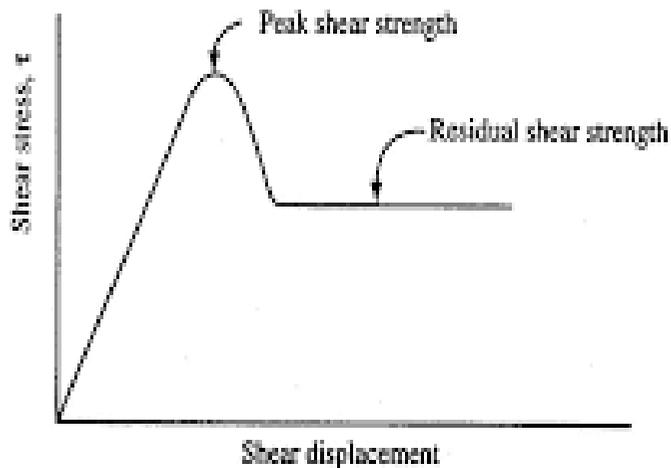


Figura 42. Esfuerzo Cortante vs Desplazamiento Cortante.
Fuente:(Norma ASTM D 5607, s.f.)

Equipo:

- Máquina de ensayo: un equipo para aplicar y registrar fuerza normal y fuerza cortante sobre el espécimen. Para especímenes de roca con dimensiones no mayores de 115mm x 125mm o si es un espécimen cilíndrico su diámetro debe ser no mayor de 102mm y su longitud no mayor de 120mm. Con capacidad de medir fuerzas hasta 11KN.
- Molde: para encapsular el espécimen en una mezcla de concreto de secado rápido.
- Medidor de desplazamientos: con escala graduada en 0.01 mm con un círculo de graduación de 100 unidades con capacidad de medir hasta 25 mm.

Preparación de muestra:

- Se pueden emplear especímenes cilíndricos o bloques de roca de geometría regular.
- Deben tener las dimensiones adecuadas para que pueda ser colocado en el molde.
- No requieren de ningún tratamiento superficial ni estar sujetos a condiciones de paralelismo.
- Seleccionar la discontinuidad o plano de falla a ser ensayado.

- Preparar el espécimen cortándolo en dos partes de 40 a 60 mm de longitud a cada lado de la zona seleccionada y unir las dos partes con cinta adhesiva.
- Se prepara una mezcla de arena, cemento y agua de secado rápido y resistencia media.
- La proporción en volumen de arena-cemento es de 3 a 2 y se emplea 700 ml de agua para la preparación de un molde.
- Se coloca el sujetador de espécimen sobre el molde y se coloca entre sus agarraderas teniendo cuidado que el plano cortante propuesto esté alineado con la posición del plano horizontal de aplicación de la carga cortante y el eje de aplicación de la carga normal.
- Se ajusta el sujetador de manera que el espécimen no se mueva de la posición deseada.
- Se cubre el interior del molde con una película de grasa para facilitar remover el espécimen después del secado de la mezcla.
- Verter la mezcla en una mitad del molde.
- Luego volver a colocar el sujetador con el espécimen introduciendo en la mezcla la mitad inferior.
- Vibrar el molde de manera que se logre compactar la mezcla.
- Se deja endurecer la mezcla por 24 horas.
- Se remueven los lados del molde y se arma la otra mitad.
- La mitad que contiene el testigo la volteamos y la colocamos apropiadamente sobre la mitad que acabamos de preparar luego ajustamos los tornillos del molde para asegurar el alineamiento requerido.
- Se añade o remueve pequeñas cantidades de mezcla con una paleta a través de la ranura.
- Dejar secar los moldes tres días como mínimo.
- Luego se desmolda el testigo y se separan las dos partes cortando la cinta adhesiva, entonces el testigo estará listo para ser ensayado.

Procedimiento:

1. Se registra el diámetro o las dimensiones de la zona escogida para calcular el área de deslizamiento.
2. Se coloca el testigo (encapsulado en la mezcla) en la parte inferior de la caja y se coloca la parte superior de la caja sobre ella.

3. Se hacen coincidir las partes cortadas en forma manual.
4. Se empieza el ensayo aplicando una carga normal pequeña para mantener la posición.
5. Se fija el medidor de desplazamientos en la parte superior para lograr registrar los movimientos horizontales.
6. Se aplica la carga normal requerida con la bomba manual, se registra y se mantiene constante.
7. Luego se aplica la carga cortante gradualmente.
8. Se registran los desplazamientos horizontales y las cargas cortantes respectivas. Al llegar al máximo valor de fuerza cortante se registra este valor y su desplazamiento.
9. Se sigue aplicando carga cortante hasta que ésta se mantiene constante, entonces habremos hallado el valor de esfuerzo cortante residual.
10. Se repite este proceso incrementando la carga normal con una razón constante.
11. Volvemos a colocar el espécimen en su posición inicial.
12. Obtenemos en cada ensayo los valores correspondientes al esfuerzo cortante máximo y residual.

Cálculos:

Se calcula el área de ensayo del testigo (A). Usando las medidas de las áreas y las cargas se calculan los valores de esfuerzo:

Esfuerzo normal $\sigma = \frac{N}{A}$ donde N es la fuerza normal.

Esfuerzo cortante residual $\tau = \frac{F}{A}$ donde F es la fuerza cortante.

Resistencia al corte $S = C_{max} + \sigma \operatorname{tg}(\phi)_{max}$

S: resistencia al corte

C_{max} : corrección (unidades de esfuerzo)

ϕ_{max} : ángulo de fricción.

Se realizan varios ensayos con diferentes cargas puntuales y distintas cargas tangenciales, varios valores de σ y el correspondiente S.

Dureza y durabilidad

Dureza: es una resistencia a la deformación elástico plástico, es una característica de los minerales predominantes en una roca y está relacionado con la compresión simple. La dureza dependerá del tipo de enlace iónico.

Durabilidad: posibilidad de resistir a los agentes destructivas que pueden ser de tipo físico o químico y se trata de definir la durabilidad de una roca frente a los agentes externos.

Estas dos propiedades se las reconoce, la dureza está relacionada a la resistencia o a la compresión simple, a mayor resistencia, mayor dureza.

La dureza dependerá del enlace molecular y caracteriza a cada mineral, así, el yeso que es blando tiene un enlace o estructura abierta, también el cuarzo, este mineral tiene la estructura de tetraedro.

Para determinar la dureza como una propiedad física, existen 3 posibilidades que corresponden al mismo número de medidas.

- Abrasión
- Cantidad de reborde
- Indentación

1. **Abrasión:** desgaste cuando están juntos 2 cuerpos sólidos, el ensayo de Los Ángeles es el que más se utiliza.
2. **Cantidad de reborde:** método de martillo de Schmidt
3. **Indentación:** Hay que rayar un cuerpo utilizando otro, método de Rockwell (metales y aleaciones metálicas)

Ensayo de laboratorio de los ángeles para una muestra (ROCA)

Norma: NTE INEN 861

El ensayo determina la pérdida de masa del agregado como resultado de una serie de acciones que consisten en colocar la muestra en un tambor giratorio de acero que gira 1000 revoluciones a una velocidad constante entre 30 y 33 rev/min. En el interior se coloca una carga abrasiva constituida por 12 esferas de acero que promedien un diámetro aproximado de 47 mm y cada una con una masa entre 390g y 445g con una masa total de 5000 g 25g.

El valor de la degradación que es la pérdida de masa del agregado con referencia a su masa inicial se determina a través de la siguiente expresión. (Figura 43)

$$\%D = \frac{B - C}{B} * 100$$

Ecuación 25. Porcentaje de degradación

dónde:

D: valor de degradación en porcentaje

B: masa inicial de la muestra del ensayo

C: masa de la muestra retenida en el tamiz de 1.70 mm, después del ensayo.

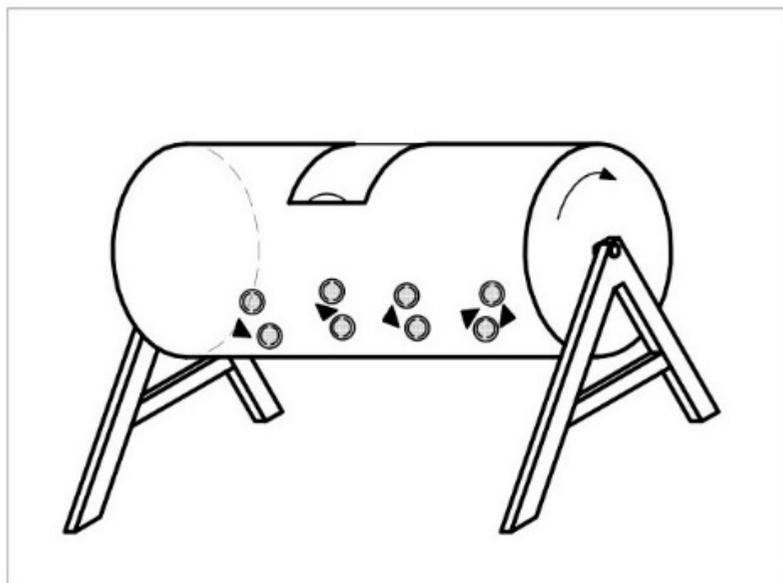


Figura 43. Máquina de los Ángeles.
Fuente: Autores

Procedimiento:

Preparación de la muestra, antes de colocar la muestra en el tambor giratorio debe ser lavada y secada a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, separar en fracciones individuales por tamaño y recombinarlas para obtener la gradación indicada en la siguiente tabla.

Tabla 7 Gradación de las muestras de ensayo.

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)		
		Gradación		
Pasante de	Retenido en	1	2	3
75	63	2500 ± 50	---	---
63	50	2500 ± 50	---	---
50	37,5	5000 ± 50	5000 ± 50	---
37,5	25,00	---	5000 ± 25	5000 ± 25
25,0	19,00	---	---	5000 ± 25
	Total	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50

Fuente: NTE INEN 861

- Obtener la masa de la muestra.
- Colocar la muestra y las esferas en la máquina de Los Ángeles, girar la máquina 1000 revoluciones a una velocidad de 30 r/min y 33 r/min.
- Luego del número prescrito de revoluciones, retirar la muestra de la máquina y realizar una separación previa sobre un tamiz de abertura mayor a 1.70 mm.
- Tamizar la porción fina sobre el tamiz de 1.70 mm
- Lavar el material más grueso de 1.70 mm y secarlo al horno a una temperatura constante de 110 °C ± 5 °C
- Determinar la masa de la muestra con aproximación de 1g.

Ejemplo:

Proyecto: Tumbabiro

Sector: Cantera mina 4

Material: TM4-M2

NORMA: NTE INEN 861:2011

Gradación escogida de la muestra: Tipo 1

B	Masa del material no desgastado	(gr)	10054,4
C	Masa del material retenido en el tamiz #12 después del ensayo	(gr)	4787,8
B-C	Pérdida por desgaste	(gr)	5266,6
D=(B-C)/B*100	Valor de la degradación en porcentaje	(%)	52,4

Cantidad de rebote o método del martillo de Schmidt para una muestra (ROCA)

Norma: I.N.V.E 413-07

Este método establece el procedimiento para determinar el índice esclerométrico del concreto endurecido empleando un martillo de acero impulsado por un resorte. En aplicación en rocas es relativamente nuevo, sin embargo se lo empezó utilizando en la minería del carbón.

Se realiza este ensayo en labores de perforación para relacionar la cantidad y calidad de la roca. (Figura 44)

Se aconseja utilizar un testigo con un diámetro $\phi \geq N_x$ (54 cm)

L= 10 - 15 cm

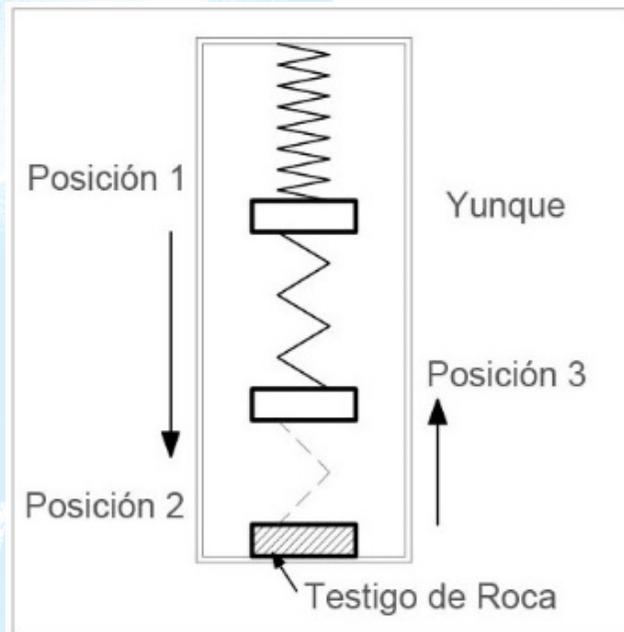


Figura 44. Martillo Schmidt.

Fuente: Autores

Procedimiento:

- Selección de la superficie a ensayar
- Secar la muestra
- Emparejar o lijar la superficie a ensayar (en caso de ser necesario)
- El testigo es golpeado con el yunque con la energía de resorte. Este golpea y rebota.
- Se debe tomar por lo menos 10 lecturas de rebote.
- Se establece un factor de corrección, resulta de 2 valores estándar sobre un promedio de 1 lecturas.

$$\text{factor de corrección} = \frac{\text{valor standar}}{\text{promedio de los 10 valores}}$$

Ecuación 26. Factor de corrección

El fabricante provee de unas piezas con valores estándar de resortes
 El factor de corrección dará los valores estándar de resorte sobre 10 lecturas promedio y con esas correcciones se trabaja. (Figura 45)

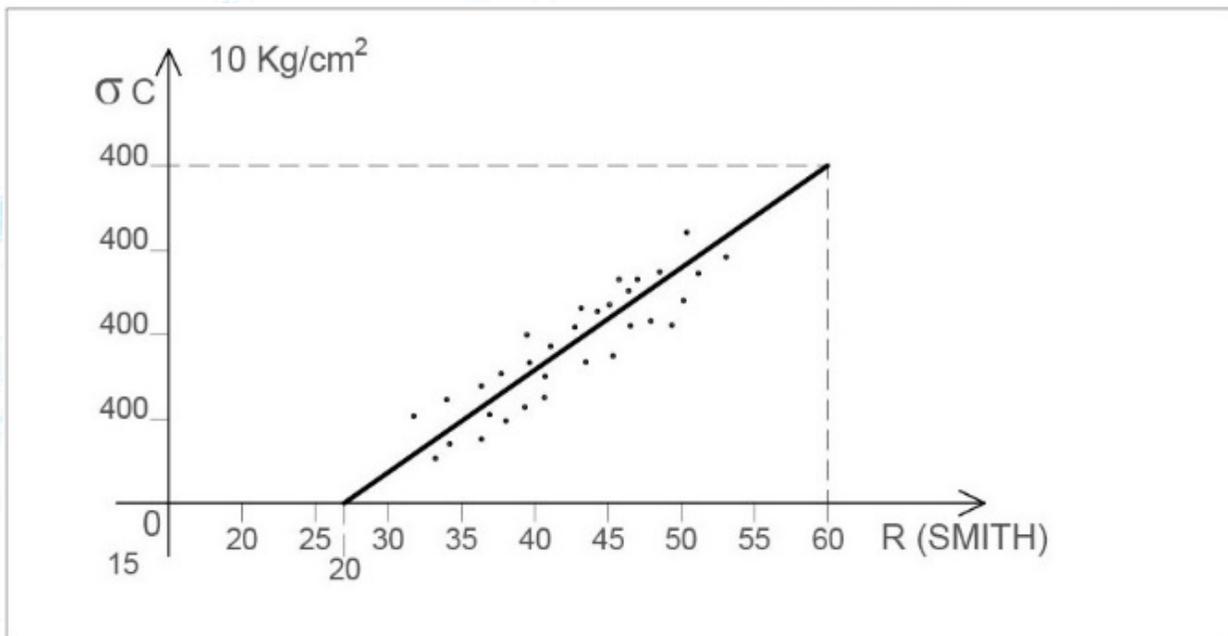


Figura 45. Esfuerzo del martillo Schmidt.
 Fuente: Autores

σ_c = resistencia a la compresión simple (kg/cm²)
 R = dureza de Schmidt (dada por la cantidad de rebote)

Ejemplo:

Proyecto: Estación Pedro Vicente Maldonado

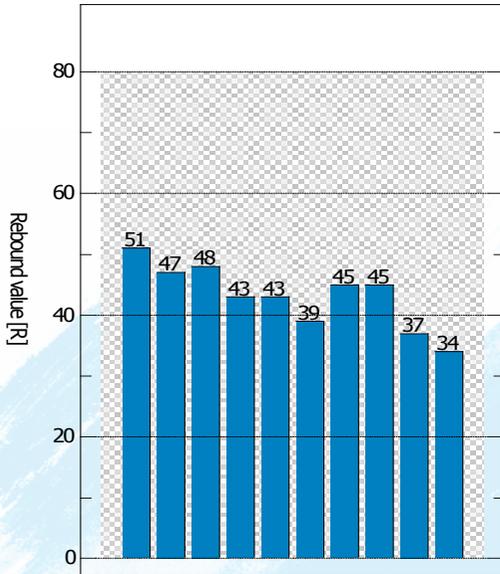
Localización: Antártica

Ensayo N° 1

Descripción: LS1 Y LS2 Helipuerto

PROCEQ - DIGISCHMIDT (4.5, 88-3385, ND 5019)

Title: EPMV_ANTAR 0002 **Date:** 11-Feb-2013 07:07 **Name:** LS1 Y LS2
Remarks: ESTACIÓN PEDRO VICENTE MALDONADO



Set parameters

Impact direction ↓
 Eliminate outliers Mx
 Conversion curve Average Curve J
 Form factor 1.00
 Time factor 1.00
 Carbonation depth d = -

Statistic

Number of measurements N = 10
 Mean rebound value m = 43.2 R
 Mean compressive strength fck = 500 kg/cm²
 Standard deviation sa = 5.2 R
 Maximum rebound value Max = 51 R
 Minimum rebound value Min = 34 R
 Span R = 17 R

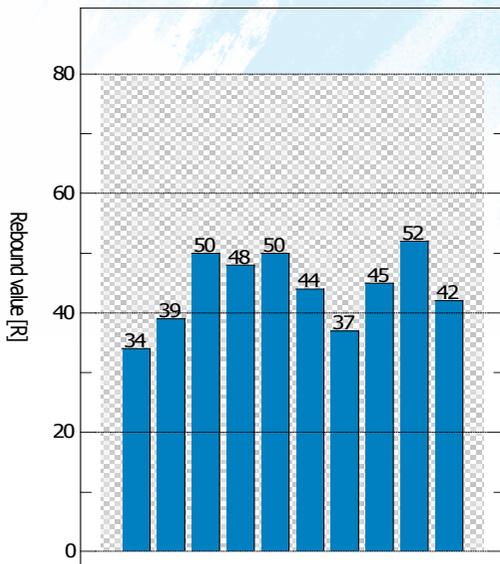
Measured rebound value [R]

51 47 48 43 43 39 45 45 37 34

Resultado: Roca medianamente alterada con Diaclasas

PROCEQ - DIGISCHMIDT (4.5, 88-3385, ND 5019)

Title: EPMV_ANTAR 0003 **Date:** 11-Feb-2013 07:09 **Name:** LS1 Y LS2
Remarks: ESTACIÓN PEDRO VICENTE MALDONADO



Set parameters

Impact direction ↓
 Eliminate outliers Mx
 Conversion curve Average Curve J
 Form factor 1.00
 Time factor 1.00
 Carbonation depth d = -

Statistic

Number of measurements N = 10
 Mean rebound value m = 44.1 R
 Mean compressive strength fck = 515 kg/cm²
 Standard deviation sa = 6.1 R
 Maximum rebound value Max = 52 R
 Minimum rebound value Min = 34 R
 Span R = 18 R

Measured rebound value [R]

34 39 50 48 50 44 37 45 52 42

Resultado: Roca medianamente alterada con Diaclasas

PROPIEDADES ELÁSTICAS

Módulo elástico

Relación de Poisson (μ)

A todo esfuerzo corresponde una deformación al aplicar el esfuerzo de espécimen, se comprime y se deforma un $\Delta l, \Delta D$; μ es la relación de estas deformaciones. (Figura 46)

ΔD Deformación perpendicular al esfuerzo.

ΔL Deformación paralela al esfuerzo.

Numéricamente $\mu = 0-0.5$ hablando de valores directos. $\mu = 0$ Cuando no hay esfuerzos, $\Delta D = 0$. En materiales como el caucho.

$\mu = 0.5$ Es el valor máximo en materiales de la naturaleza.

En cuanto a las rocas $\mu = 0.1-0.4$

Este valor se lo pide en cuanto a diseños en roca en una propiedad elástica de las rocas, define la propiedad elástica.

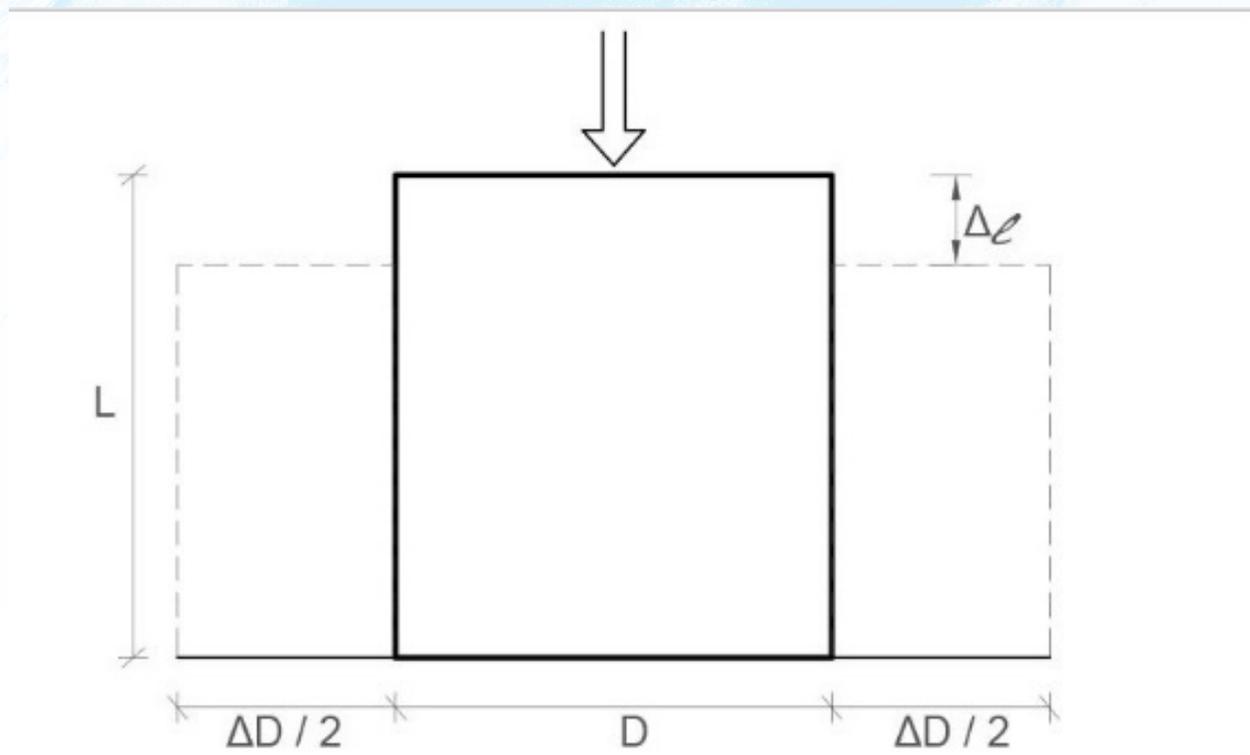


Figura 46. Relación de Poisson.

Fuente: Autores

Módulo de elasticidad

Es una propiedad característica de cada material determina la deformación de un cuerpo sometido a un esfuerzo. La deformación unitaria de un elemento es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. (Figura 47)

El módulo de elasticidad es el mismo módulo de Young.

ΔL Representa la deformación

ΔL y L Son longitudes

ε = deformación unitaria, esta es adimensional. Es la fuerza que produjo la deformación.

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$$

Ecuación 27. Deformación unitaria

$$\varepsilon = F \times k^{te}$$

Ecuación 28. Deformación unitaria

$$k = \frac{1}{E}$$

Ecuación 29

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 30. Esfuerzo normal

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ecuación 31. Módulo de Young

$$E = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2} \text{ Igual que el esfuerzo.}$$

donde:

E = módulo de Young

σ = esfuerzo

ε = deformación

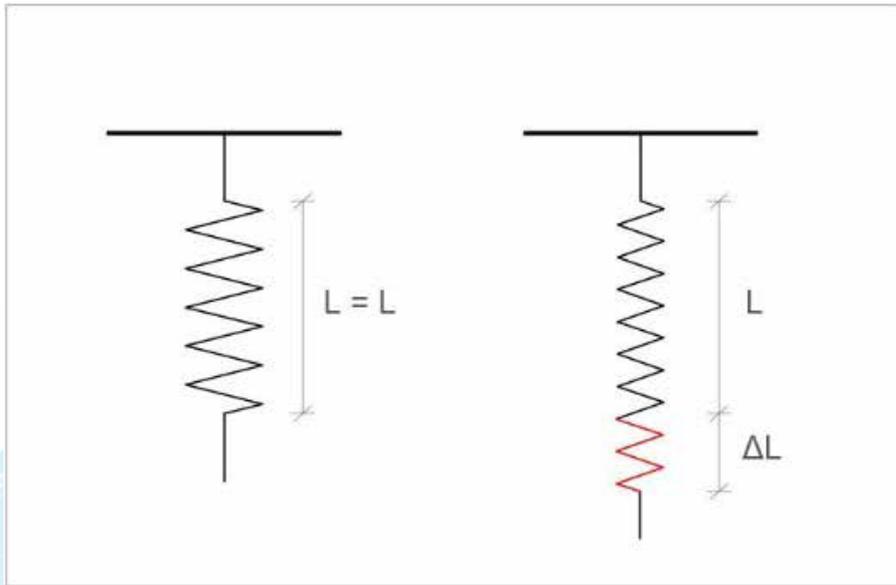


Figura 47. Módulo de elasticidad.
Fuente: Autores

Ley de Hooke

Para definir las propiedades elásticas de la roca se necesita $\sigma f(\epsilon)$.

En el material ideal las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos que le producen. El módulo será la pendiente de la recta (Figura 48)

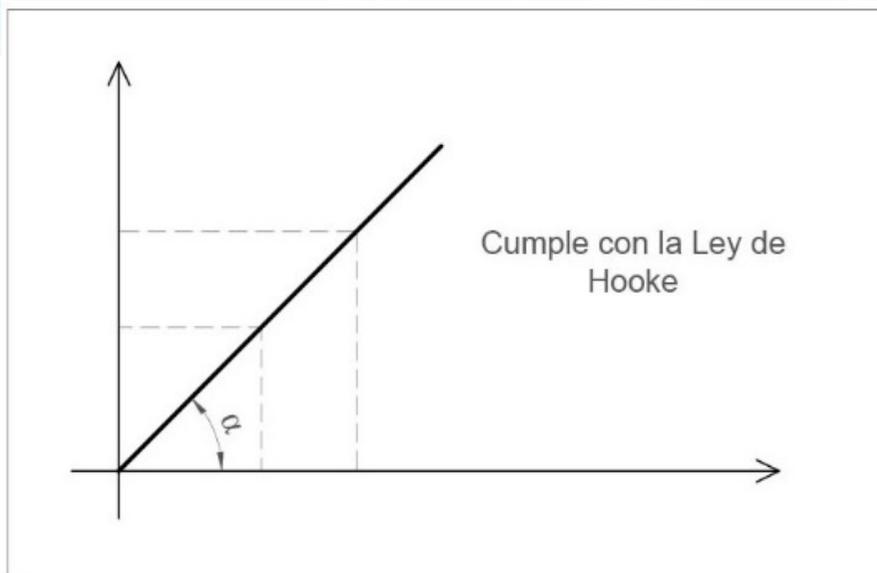


Figura 48. Ley de Hooke.
Fuente: Autores

El esfuerzo tiene las mismas dimensiones físicas que el módulo

$$E = \tan(\alpha) = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Ecuación 32. Módulo de Young

Determinación del módulo de young (E) en las rocas

Norma: ASTM D3148

Para determinar el módulo de Young en las rocas realizamos un ensayo de compresión simple. En este ensayo se coloca la muestra en un bastidor de carga, la carga axial que se aplica al espécimen aumenta continuamente, y la deformación que sufre acciona en función de la carga. (Figura 49)

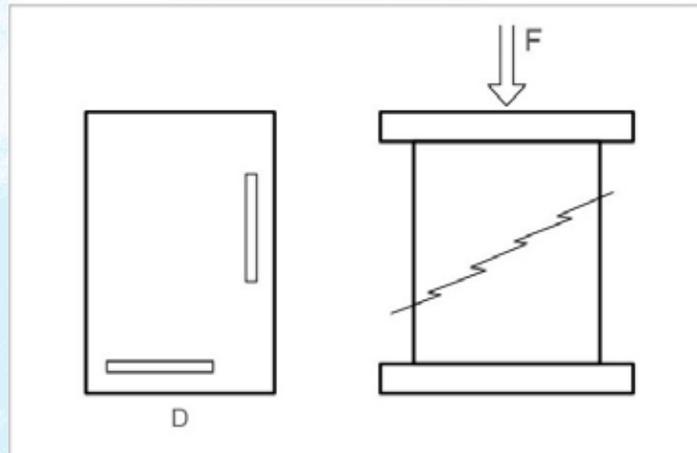


Figura 49. Corte simple.
Fuente: Autores

Se utilizan los deformímetros eléctricos (SR.4) in situ; pequeños conductos eléctricos de determinada longitud L y determinada sección V . (Figura 50)

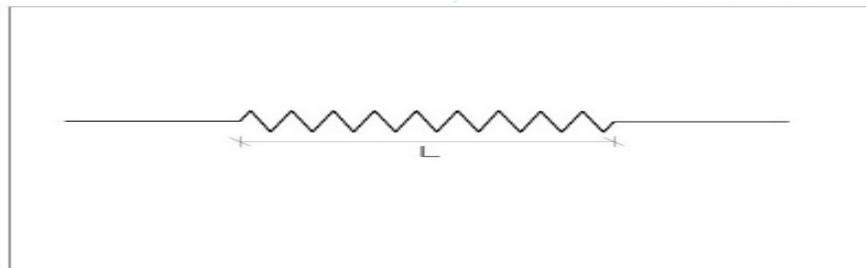


Figura 50. Deformación elástica.
Fuente: Autores

En el experimento deformación, según los deformímetros, para medir las posibles deformaciones longitudinales y diametrales.

Se debe usar por lo menos 3 especímenes para cada ensayo.

1. Se lleva hasta la ruptura y se determina el valor de la carga mínima

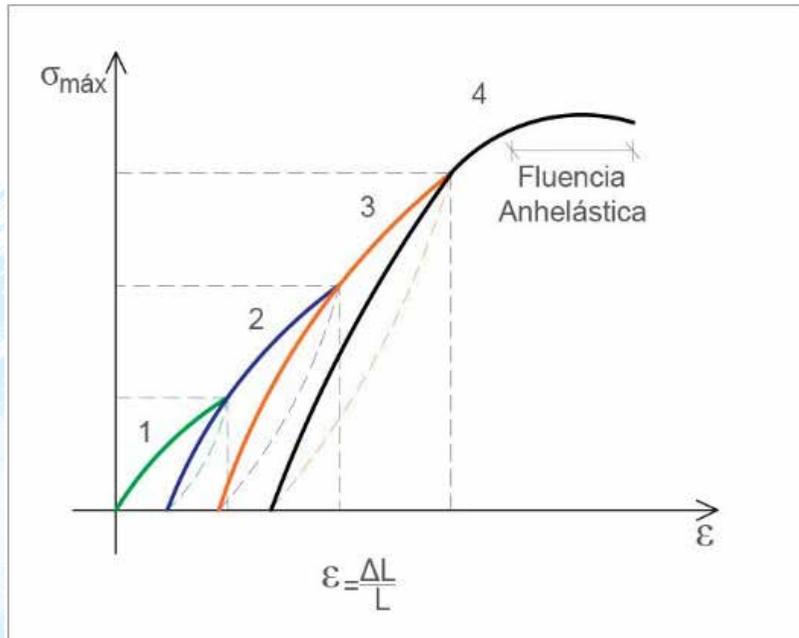


Figura 51. Fluencia elástica.
Fuente: Autores

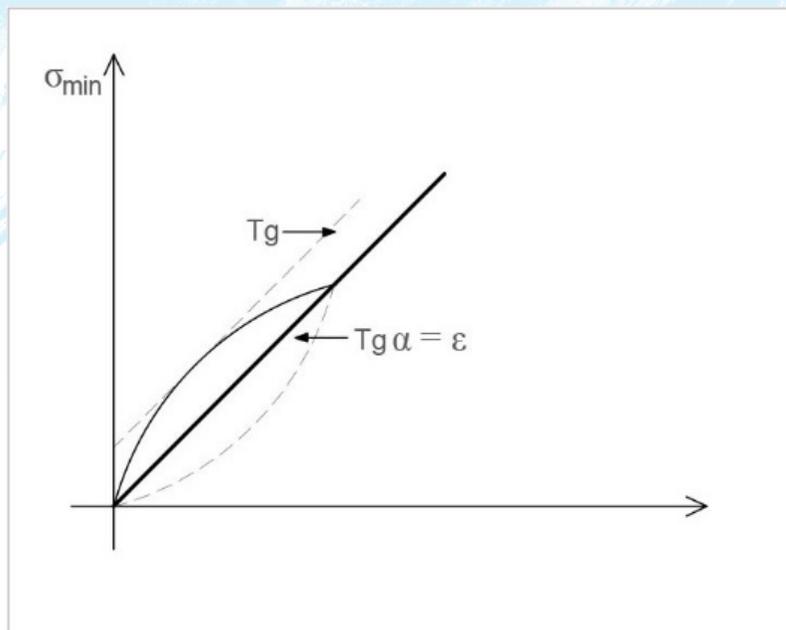


Figura 52. Deformaciones.
Fuente: Autores

Fuente: Autores

Se coloca en la prensa universal y el ensayo se lo realiza en 3 ciclos de carga y descarga

En el primero se pone 25% de la σ máxima

En el segundo el 50% de la σ máxima

En el tercero el 75% de la σ máxima

σ	ε
σ_1	ε_1
σ_2	ε_2
.	.
.	.
.	.
σ_n	ε_n

El espécimen de 2 ha sufrido deformación y esta no ha podido recuperarse; esta es una deformación plástica, es el primer ciclo.

Se deja recuperar el espécimen 5 minutos y empieza el segundo ciclo, se incrementa la magnitud de carga hasta el 50% de la σ máxima obteniendo otra referencia no recuperable.

Luego de 5 minutos de reposo, se carga y se lleva a 75% de la σ máxima para ir a la carga máxima.

Se han construido 3 curvas para calcular E ($\tan(\alpha)$) se escoge como punto de referencia la curva 2, que utiliza una carga de hasta el 50% (curva de ascenso o incremento), a esta curva se la puede trazar varias tangentes y una secante que une el origen con el punto de la carga máxima y sobre esta secante se puede determinar la pendiente.

$$\tan(\alpha)=E$$

Ecuación 33

Con el 50% de la carga tiene un mayor comportamiento elástico, esto es luego de pasar el primer ciclo, por eso se utiliza después en el segundo ciclo, donde existe disminución de fisuras, la relación adquiere un comportamiento monolítico, un acomodamiento de los granos de roca.

Fenómeno de histéresis da una indicación del comportamiento elástico del material.

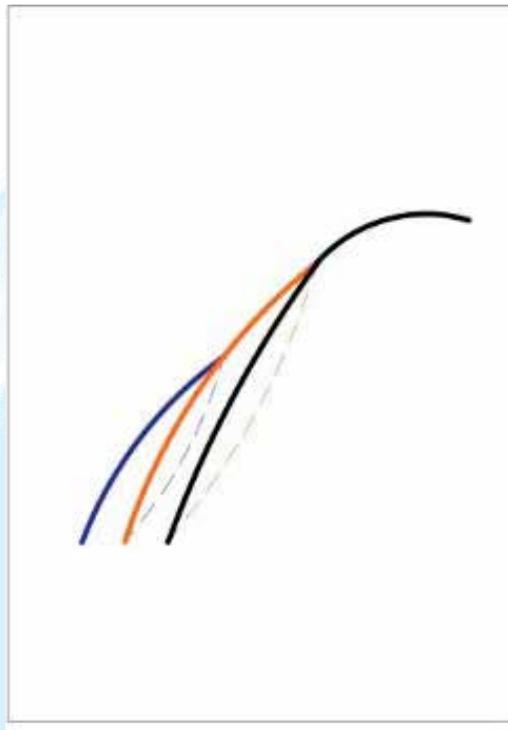


Figura 53. Deformaciones.
Fuente: Autores

Fluencia inelástica

Es una propiedad en la que ya no existe relación entre deformación y esfuerzo.

Estimado E

Velocidades en datos sísmicos para obtener valores estimados de E se utiliza la densidad, este no puede sustituir ensayos

Valor numérico	Densidad (g/cm ³)	E= (10 ³ kg/cm ³)
Bajo	2.1-2.3	60 – 180
Medio	2.5 – 2.7	150 – 450
Alto	2.8 - 3.0	500 – 700

El valor para el hormigón tiene valores elásticos $E_H = 200 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$

Resistencia última a la compresión simple

q $\mu; \sigma_c$ A través de experimentos se ha llegado a determinar que el módulo elástico es 300 veces la resistencia a la compresión simple.

$$E=300\sigma_c$$

Ecuación 34. Relación del módulo de elasticidad con la compresión simple

Ejemplo:

$$\sigma_c = 1700 \frac{kg}{cm^2}$$

$$E = 300 \times 1700 = 510000 \text{ kg/cm}^2$$

Velocidad de ondas sísmicas en una muestra (ROCA)

Norma: ASTM D5777

Generamos ondas sísmicas producidas por un impacto mecánico que se propagan en el subsuelo, la velocidad del desplazamiento de las ondas depende esencialmente de la compacidad de las capas consideradas. Dependerá de las propiedades del medio.

- Densidad: poros, fisuras, micro fisuras.
- Número de discontinuidades: la roca mientras más discontinuidades tiene, la velocidad disminuye, mientras más compacta, la velocidad será mayor.
- Ondas superficiales (love rayleigh)
- Ondas longitudinales de compresión, primeras ondas "P", son las que más rápido viajan y más fáciles de medir.
- Ondas transversales de corte u ondas "S" (Figura 54)

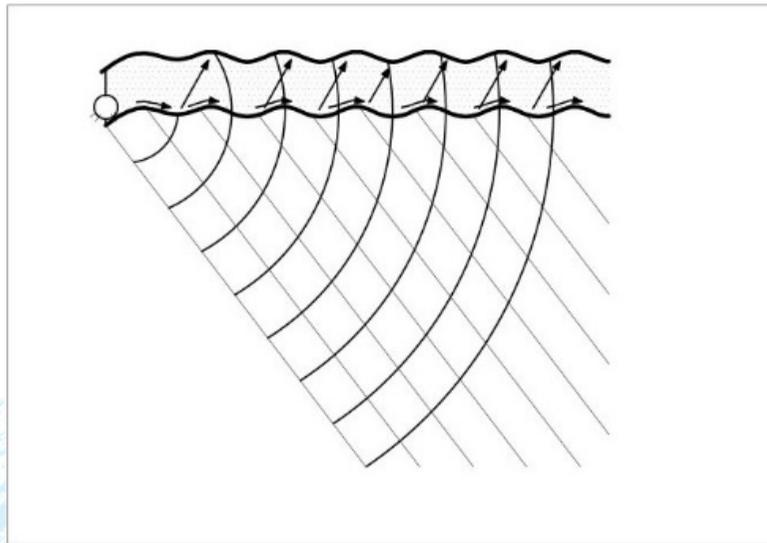


Figura 54. Ondas transversales de corte.
Fuente: Autores

La relación de transmisión de ondas se utiliza generalmente para determinar si el terreno es friable o no.

Tabla 8 Velocidad de desplazamiento de ondas según el tipo de suelo.

MATERIAL	VELOCIDAD pie/seg
Suelo	800-1800
Suelo denso	1500-2000
Arena o Grava arriba del nivel freático	1500-4000
Arcilla, pizarra blanda	4000-7000
Pizarra dura	6000-10000
Arena gruesa	5000-10000
Limo alterado	4000-6000
Limo	8000-18000
Basalto	8000-13000
Granito	10000-20000
Deposito glacial	40000-700
Losa	10000-12000
Agua	5000
Aire	11000
1 pie/seg = 0.3048 m/seg	

Fuente: ATSM D5777

Ejemplo:

Línea sísmica 1

Geófonos a intervalos de 6 m, distancia entre las fuentes 72 m.

Tabla 9 Tiempos medidos en la primera llegada.

AX (m)	tAX(ms)	tBX (ms)
0	0	
6	4	140
12	17,3	138
18	25,3	126
24	29,3	120
30	42,7	112
36	56	107
42	60	100
48	72	93,3
54	80	73,3
60	84	49,3
66	94,7	36
72	96,6	24

donde: (Figura 55)

AX: distancia desde la fuente A hasta un receptor en X

tAX: tiempo de llegada al receptor en X desde la fuente A

tBX: tiempo de primer llegada al receptor X desde la fuente B

MATERIAL	VELOCIDAD (pie/seg.)
Suelo	800 - 1800
Suelo Denso	1500 - 2000
Arena o Grava arriba Nivel Freático	1500 - 4000
Arcilla, Pizarra Blanda	4000 - 7000
Pizarra Dura	6000 - 10000
Arena Gruesa	5000 - 10000
Limo Alterado	4000 - 6000
Limo	8000 - 18000
Basalto	8000 - 13000
Granito	10000 - 20000
Depósito Glacial	40000 - 7000
Losa	10000 - 12000
Agua	5000
Aire	11000

1 pie/seg. = 0.3048 m/seg.

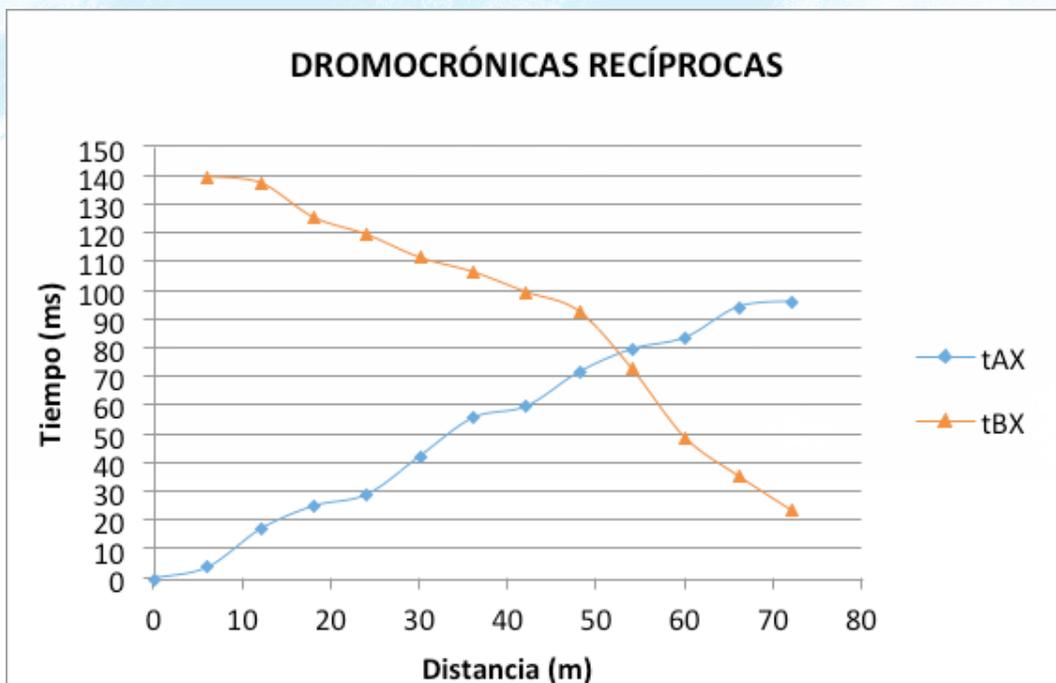


Figura 55. Tiempos de primera llegada, tabla.
Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

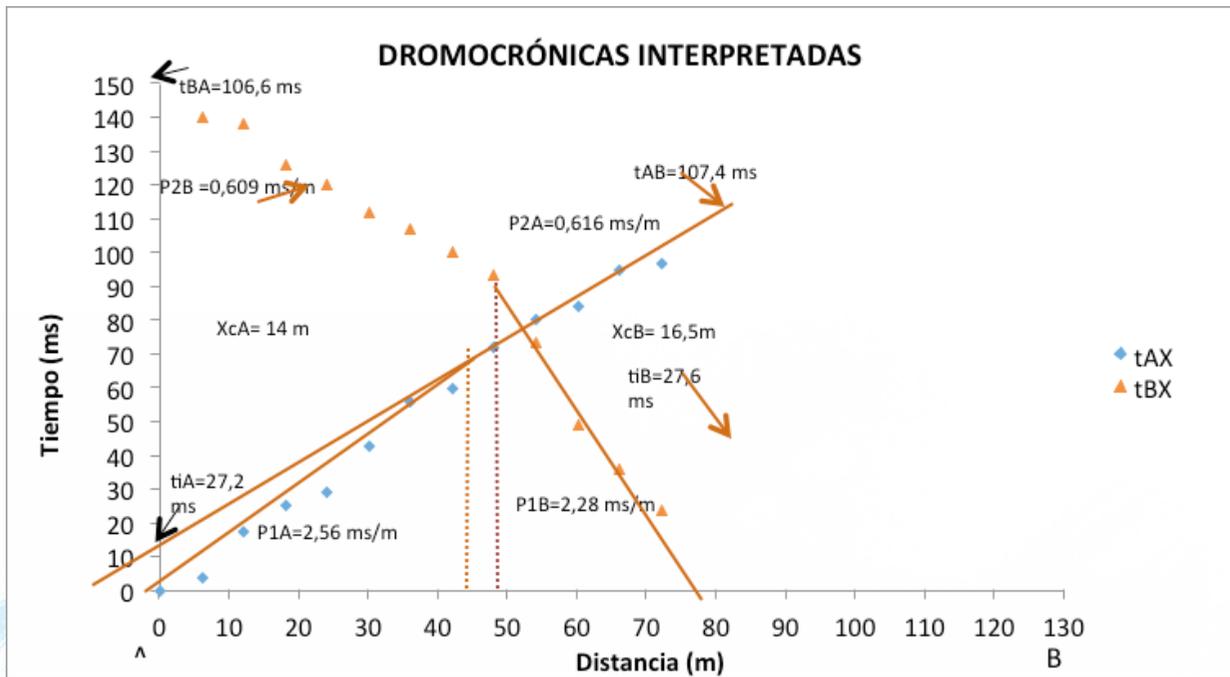


Figura 56. Dromocrónicas de tiempos de primera llegada interpretadas en las que se ajustan los puntos de ondas directas y ondas cónicas mediante rectas.

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

donde:

P1A: pendiente de la recta de ajuste a los tiempos de llegada de la onda directa con fuente en A

P1B: Pendiente de la recta de ajuste de los tiempos de llegada de la onda *directa* con fuente en B

P2A: Pendiente de la recta de ajuste de los tiempos de llegada de la onda *cónica* con fuente en A

P2B: Pendiente de la recta de ajuste de los tiempos de llegada de la onda *cónica* con fuente en B

tiA: Tiempo de intercepto de la recta de ajuste de la onda *cónica* con fuente en A

tiB: Tiempo de intercepto de la recta de ajuste de la onda *cónica* con fuente en B

tAB: Tiempo total de la onda *cónica* con fuente en A (extrapolando recta de ajuste si no hay detector en B)

tBA: Tiempo total de la onda *cónica* con fuente en B (extrapolando recta de ajuste si no hay detector en A)

Tabla 10 Valores de parámetros medidos en las dromocrónicas.

P1A	P1B	P2A	P2B	tiA	tiB	tAB	tBA	XcA	XcB
1,580 ms/m	3,300 ms/m	1,250 ms/m	1,225 ms/m	10,00 ms	48,00 ms	110,00 ms	150,00 ms	46,00 m	30,00 m

Se establece a continuación la lentitud promedio de la primera capa:

$$P1 = \frac{P1A + P1B}{2}$$

Ecuación 35. Promedio tiempos de llegada

$$P1=2.44 \text{ ms/m}$$

El inverso de la lentitud P1 es la velocidad promedio armónico V1:

$$V1 = \frac{1}{P1}$$

Ecuación 36. Velocidad promedio

$$V1=0.41 \text{ m/ms}$$

$$V1=409.84 \text{ m/s}$$

Se calcula el ángulo de refracción crítica y buzamiento de la interface.

$$\alpha c = \frac{\arcsen\left(\frac{P2B}{P1}\right) + \arcsen\left(\frac{P2A}{P1}\right)}{2}$$

Ecuación 37. Ángulo de refracción

$$\alpha c = 30.48^\circ$$

$$\beta = \frac{\arcsen\left(\frac{P2B}{P1}\right) - \arcsen\left(\frac{P2A}{P1}\right)}{2}$$

Ecuación 38. Buzamiento de interface

$$\beta=-0.34^\circ$$

Un buzamiento negativo implica que el espesor de la capa se incrementa de A hacia B. En este caso el valor es pequeño y puede considerarse que la primera capa mantiene su espesor constante.

Obtenido el ángulo crítico, se puede calcular la lentitud de la segunda capa y su velocidad.

$$P2=P1*\text{sen}(\alpha c)$$

Ecuación 39. Tiempo de llegada para la segunda onda

$$P2=1.2375 \text{ ms/m}$$

$$V2 = \frac{1}{P2}$$

Ecuación 40. Velocidad de llegada segunda onda

$$V_1=808.1 \text{ m/s}$$

Propiedades elásticas dinámicas

Las propiedades elástico dinámicas se las puede determinar por la transmisión de ondas sísmicas. Estas ondas elásticas nos darán las propiedades sísmicas.

Velocidad de ondas P

Velocidad de ondas S

γ = densidad del medio

E=módulo elástico

$V_p=\alpha$,

$V_s=\beta$, Datos medidos en el terreno

E_d = módulo elástico dinámico

E_s = módulo estático

$E_d > E_s$

$$\alpha^2 = \frac{E(1-\mu)}{\gamma(1-\mu)(1-2\mu)}$$

Ecuación 41. Velocidad de ondas P

$$\beta^2 = \frac{E}{2\gamma(1+\mu)}$$

Ecuación 42. Velocidad de ondas S

Experimentalmente si $\alpha=3000 \text{ m/s}$ y $\mu=0.3$

Bajo estas ecuaciones se tendrá una ecuación con una sola incógnita.

Clasificación de las rocas para los proyectos de ingeniería civil

Desde el punto de vista geológico y de acuerdo con la génesis, se tiene que:

- Rocas ígneas intrusivas
- Rocas ígneas extrusivas o efusivas
- Rocas sedimentarias
- Rocas metamórficas

Desde el punto de vista de la ingeniería civil se clasifican de acuerdo a 2 parámetros:

- E= módulo elástico
- σ_c = resistencia a la compresión simple

1. Resistencia a la compresión simple: existen 5 clases, las mismas que se adjuntan en la tabla de la hoja.

2. Módulo relativo: $\frac{E_s}{\sigma_c} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A} = \text{adimensional} = \text{módulo relativo} = \text{razón de módulos}$

BM= resistencia a la compresión alta con módulo elástico medio

C= resistencia media

Tabla 11. Clasificación de la resistencia de la roca matriz según ISRM

Clase	Descripción (ISRM)	Resistencia a la compresión simple (MPa)
	Extremadamente Blanda	<1
	Muy blanda	1 - 5
	Blanda	5 - 25
	Moderadamente dura	25 - 50
	Dura	50 - 100
	Muy dura	100 - 250
	Extremadamente dura	➤ 250

Fuente: ISRM (1981)

Tabla 12 Clasificación de la resistencia de la roca matriz según Bieniawski.

Resistencia (Bieniawski)	Valores del ensayo PLT (MPa)	
Muy baja	No aplicable	Suelos
		Rocas Blandas
Baja	1 – 2	
Media	2 - 4	Rocas duras
Alta	4 – 8	
(>200) Muy blanda	>10	

Fuente:(Bieniawski, 1979)

Tabla 13 Módulo relativo para la clasificación de rocas.

MR	Clase	Descripción
H	Alto módulo relativo	> 500
M	Módulo relativo medio	200 – 500
L	Módulo relativo bajo	< 200

Fuente: Autores

Para la descripción de la roca se utiliza una sola palabra geológica, por ejemplo:

Caliza BM

Basalto AM primero la resistencia, luego el módulo.

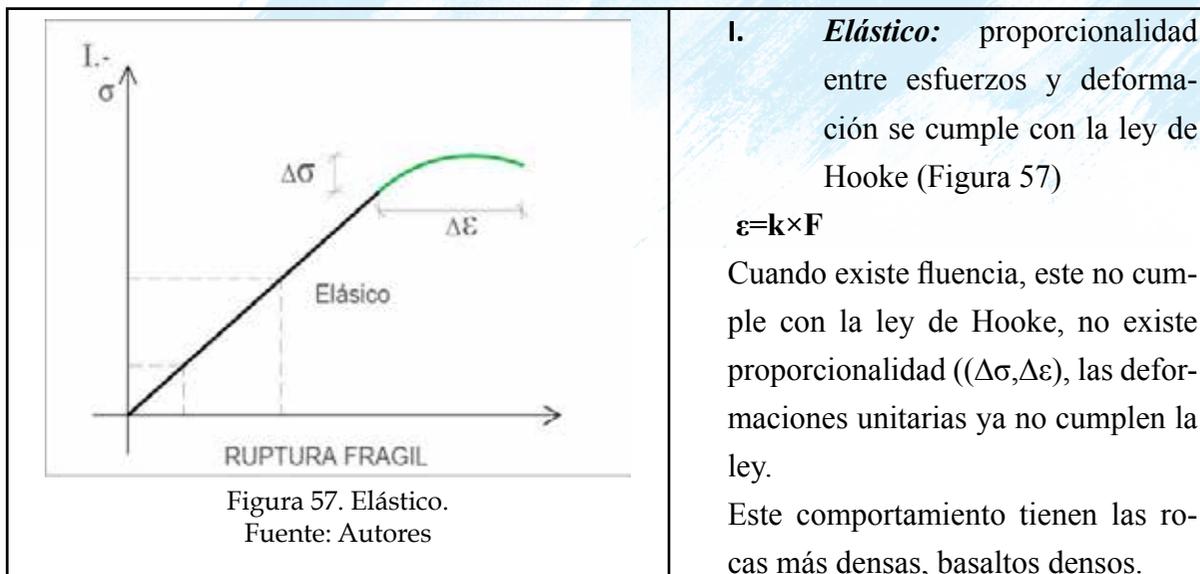


Figura 57. Elástico.
Fuente: Autores

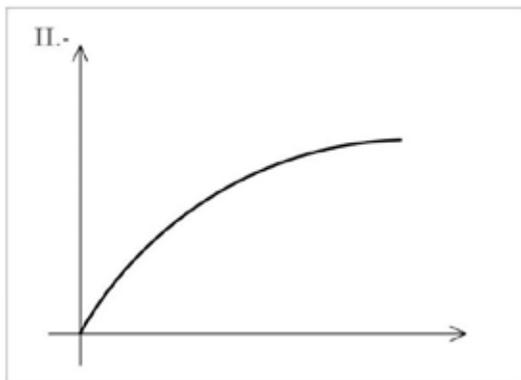


Figura 58. Elástico plástico.
Fuente: Autores

II. **Elástico plástico:** empieza con un comportamiento plástico hasta que termina con la ruptura. Un caso típico son las lutitas. (Figura 58)

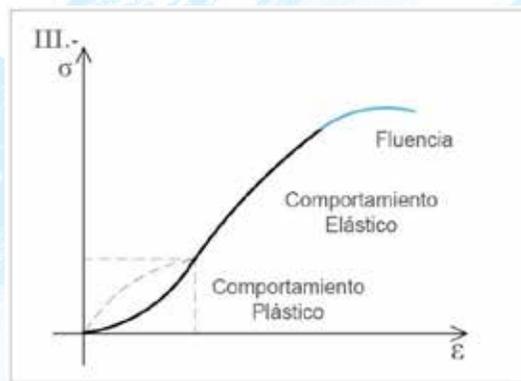


Figura 59. Plástico elástico.
Fuente: Autores

III. **Plástico elástico:** en el primer tramo no existe proporcionalidad entre $\Delta\sigma$ y ϵ . En el segundo tramo existe un comportamiento elástico, tiene un carácter monolítico. (Figura 59)

Por el tercero, se termina con una fluencia típica de las areniscas.

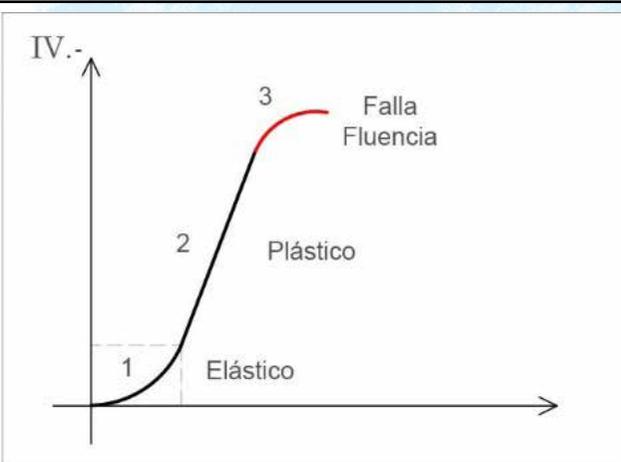


Figura 60. Plástico-elástico-plástico.
Fuente: Autores

IV. **Plástico –elástico plástico:** la deformación no es proporcional con el esfuerzo. (Figura 60)

- 1) *Plástico* en primera instancia, se acentúan y se cierran los poros y unos momentos la roca se deforma monolítica.
- 2) *Elástico* característico para el mármol.

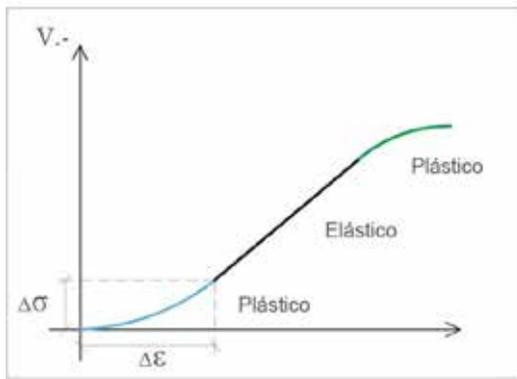


Figura 61. Compresibilidad. Plástico.
Fuente: Autores

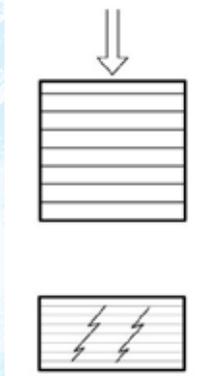


Figura 62. Compresibilidad. Plástico hasta ruptura.
Fuente: Autores

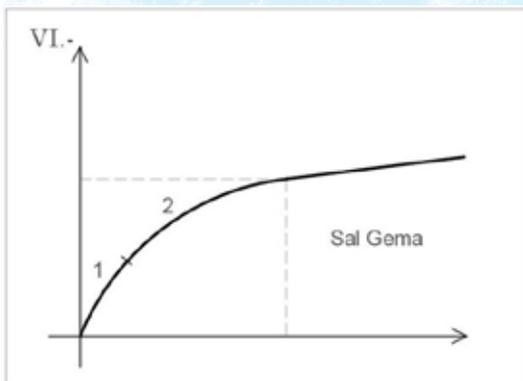


Figura 63. Elástico plástico.
Fuente: Autores

V. De compresibilidad: gran compresibilidad y la roca se deforma. (Figura 61)

- 1) Un comportamiento plástico, característica por su gran compresibilidad.
- 2) Plástico hasta la fluencia y rotura
Característico para las rocas con discontinuidades (esquistos, que se cortan perpendicularmente a la foliación)

VI. Elástico plástico con fluencia: la roca soporta un peso determinado y luego se deforma. La sal gema que es la única roca. (Figura 63)

Desarrollo de las fases de exploración para una obra de ingeniería civil.

FASE	ESTUDIO	DESARROLLO
Reconocimientos preliminares	Topografía	Recopilación de cartas y mapas topográficos, fotos aéreas e imágenes satelitales. Restituciones fotogramétricas
	Ingeniería geológica	Recopilación de mapas y datos bibliográficos. Estudio de sensores remotos: Imágenes satelitales, fotografías aéreas, radares Levantamientos de campo: fallas, juntas, litologías, estructuras.
Prefactibilidad y factibilidad Ingeniería a detalle	Topografía	Levantamientos fotogramétricos (control terrestre), levantamiento topográfico
	Levantamiento de ingeniería geológica	Información sobre litología, estratigrafía, geología estructural.
		Litología: naturaleza de las rocas, características de textura y propiedades
		Estratigrafía: origen, espesor, distribución y posición secuencial de las distintas unidades litológicas presentes.
		Estructuras: discontinuidades en la caracterización de un macizo, existen fallas, juntas, planos de estratificación, de foliación.
Fallas:	<input type="checkbox"/> Normal o gravitacional o distensiva <input type="checkbox"/> Inversa <input type="checkbox"/> Transcurrente.	

Los estudios de imágenes satelitales en una herramienta. Las fotos aéreas y algún otro sensor remoto constituyen herramientas a las que el geólogo puede acceder. (Eros Centerdata)

Un geólogo debe ir al campo luego de haber estudiado mapas y radares.

Levantamiento geológico, tectónico, estructural, estratigráfico, litológico, presencia de fallas, juntas y litología.

Litologías especiales son un punto de atención que se debe tomar en cuenta desde un principio y tener cuidado en su estudio.

Arcillas expansivas: estas absorben gran cantidad de agua, si hinchán y desarrollan grandes esfuerzos, pudiendo romper construcciones y evaporarse el agua pueden ocasionar colapsos.

Yacimientos minerales, anhídridos (evaporados). Yeso, es soluble en presencia de agua, calizas, calcitas, dolomitas.

Rocas blandas, lutitas, areniscas, arcillas, areniscas blandas, esquistos, esquistos gráficas, esquistos micáceos, filitas.

Prefactibilidad

El levantamiento fotogramétrico da mapas mucho más exactos.

Levantamientos: topográficos, medición de campo.

Levantamientos de ingeniería geológica: se debe procurar información litológica, naturaleza de la roca, estratigrafía y geología estructural.

Características texturales y propiedades:

<i>Litología</i>	Naturaleza de la roca
<i>Estratigrafía</i>	<p>Buscar datos sobre origen, espesor, distribución y posición secuencial de las distintas unidades litológicas presentes.</p> <p>Formación (edades)</p> <p>Depósitos en capas</p>
<i>Estructuras</i>	<p>Información sobre las discontinuidades en la caracterización de un macizo, planos estratigráficos, planos de foliación.</p> <p>Discontinuidades: juntas, fallas</p> <p>Fallas: normal o gravitacional, transcurrente, transversa</p>

FALLA NORMAL

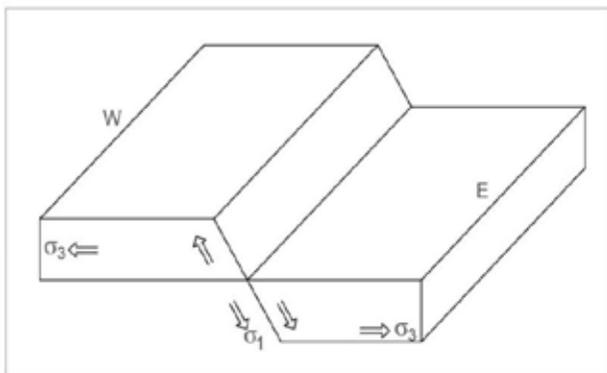


Figura 64. Falla normal.
Fuente: Autores

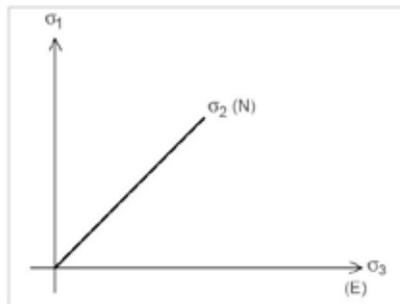


Figura 65. Diagrama falla normal.
Fuente: Autores

Falla normal gravitacional o distensiva. La dirección está en sentido de y el bloque por gravedad, desciende. (Figura 64 y 65)

FALLA INVERSA

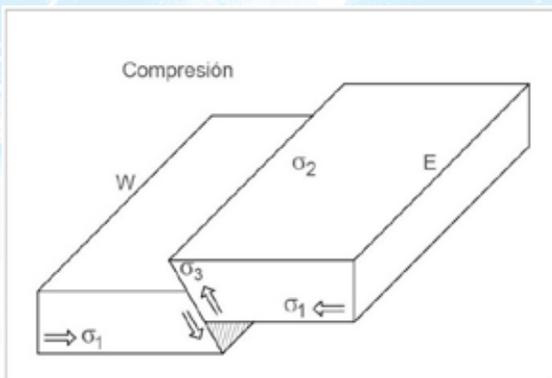


Figura 66. Falla inversa.

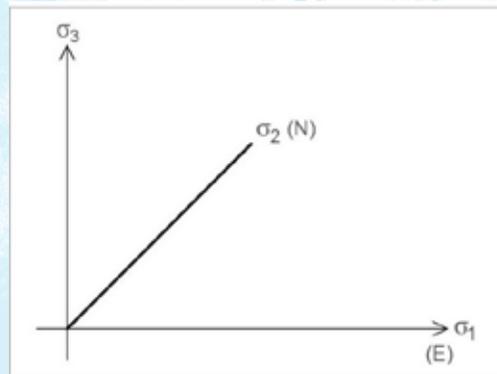


Figura 67. Diagrama falla inversa.
Fuente: Autores

El esfuerzo principal está orientado en el esfuerzo principal menor a está orientado en el trazo de la falla (Figura 66 y 67)

FALLA TRANSCURRENTE

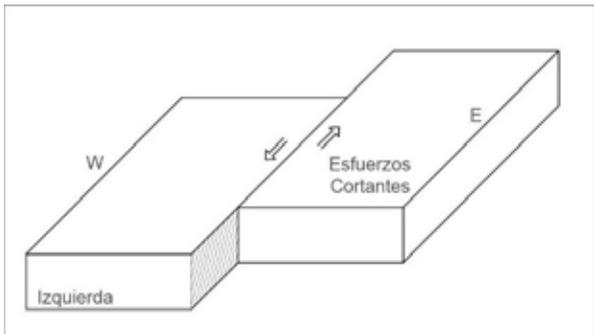


Figura 68. Falla transcurrente.
Fuente: Autores

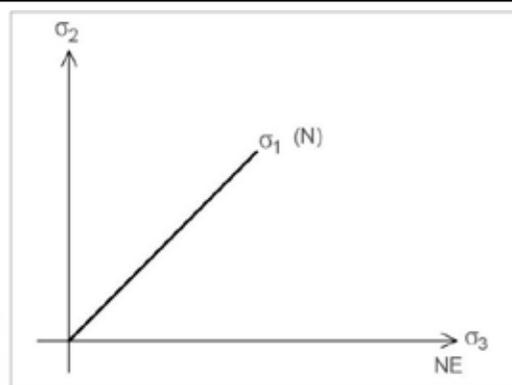


Figura 69. Diagrama falla transcurrente.
Fuente: Autores

Izquierda o siniestral, derecha o dextral. Esfuerzos cortantes. (Figura 68 y 69)

Juntas: se denominan así a todas las rupturas de la corteza terrestre, a lo largo de las cuales no existe movimientos diferenciales, es una simple ruptura, agrupamos aquí a las juntas, fisuras, fallas, involucra a todas y constituye un elemento fundamental.

Diaclasas: la distancia entre juntas puede variar entre unos centímetros y la roca aparece como roca lajada o laminada y si la distancia d , se incrementa más de 2 metros, en ese instante tenemos en roca laminada y masiva y se debe ver con mayor propiedades las que tengan una distancia mayor. (Figura 70)

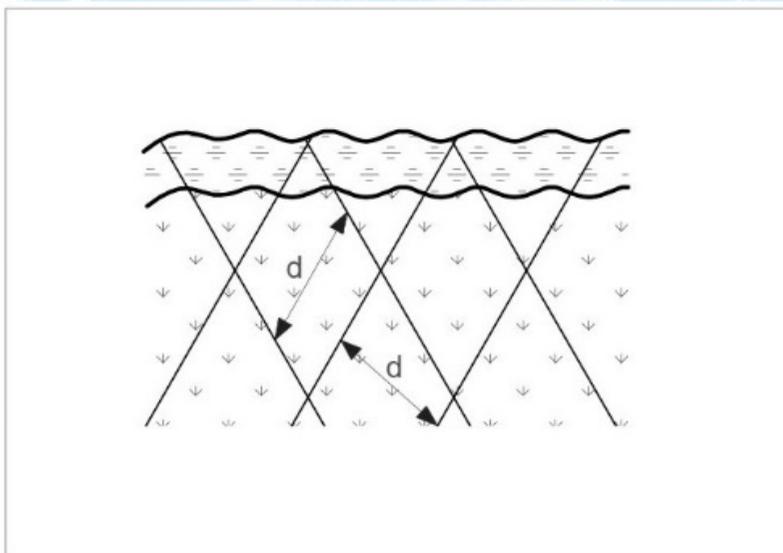


Figura 70. Diaclasas.
Fuente: Autores

Terminología descriptiva para la separación de juntas

Término	Separación entre juntas
Muy unidas	<5cm
Juntas proximales	5cm – 30cm
Bastante proximales	30cm – 1m
Separadas	1m – 3m
Juntas muy separadas	>3m

Normalmente las familias tienen su distancia entre juntas. (Figura 71)

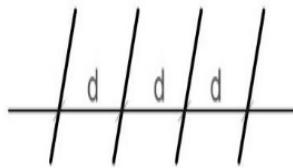


Figura 71. Distancias.
Fuente: Autores

Grado de abertura

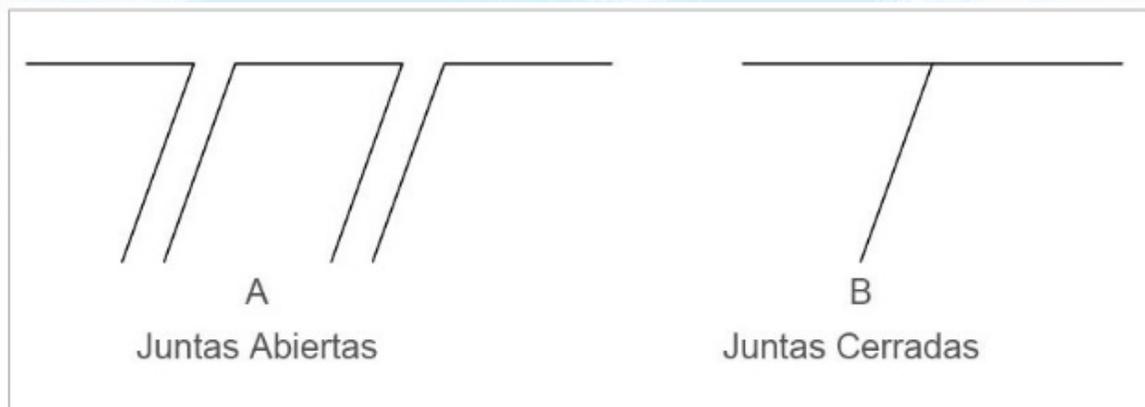


Figura 72. Tipo de juntas.
Fuente: Autores

Juntas abiertas, limpias, abiertas con relleno. (Figura 72)
Existen problemas de permeabilidad y problemas de .

Homogeneidad del perfil

Se refiere al plano de ruptura. (Figura 73)

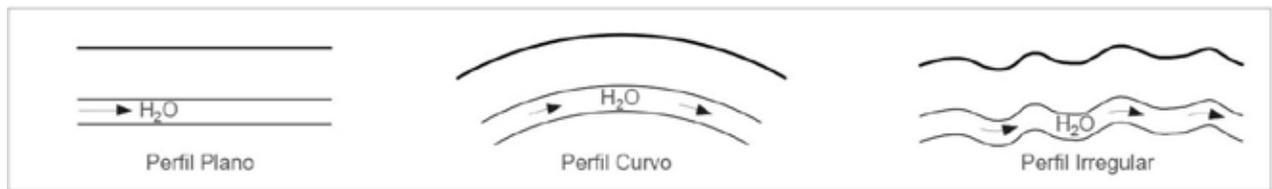


Figura 73. Tipos de perfiles.
Fuente: Autores

Se tiene problemas de permeabilidad y de resistencia al corte.
En el caso de resistencia al corte, un perfil irregular será mucho más cambiante.

Textura superficial

La textura superficial de un plano de junta será



Figura 74. Textura Superficial.
Fuente: Autores

Las juntas generalmente cambian de acuerdo a lo que se presente en la superficie. (Figura 74)

Zona cizallada

En la mayoría de los casos se tiene rocas metamórficas y en las que se han sufrido plegamiento. (Figura 75)

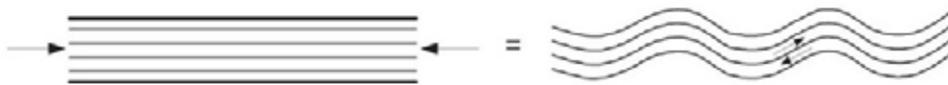


Figura 75. Zona cizallada
Fuente: Autores

Pequeña milotización, zona cizallada de foliación.

Fenómenos de geodinámica

Geodinámica externa:

- meteorización de las rocas
- erosión
- estabilidad de pendientes

Geodinámica interna:

- fallas activas
- tectónica, sismotectónica
- vulcanismo y sismicidad, riesgos volcánicos y sísmicos.

Meteorización

Rocas meteorizadas y suelos residuales

La meteorización es un proceso mediante el cual una roca se convierte en suelo residual y son un conjunto del resultado del proceso de meteorización.

Entre los factores de meteorización se tiene:

- clima: en el clima tropical es más favorable que en los desiertos.
- Tipo de roca: se refiere a la composición mineral
- Número de fracturas: conductos por donde ingresa el agua
- Cantidad y tipo de vegetación: productos de ácidos orgánicos
- Topografía: mayor meteorización en las cimas y en los bordes de los volcanes.

En la meteorización de las rocas actúan agentes atmosféricos, aire y agua.

La meteorización es de tipo:

- Meteorización mecánica: desintegración. No ocurre cambio mineralógico
- Meteorización química: descomposición. Se presentan cambios en los minerales.

Factores que controlan la meteorización mecánica

- Acuñaamiento por hielo.
- Abrasión por eólica (viento) e hidráulica (agua), el viento puede trasportar partículas hasta de arenas gruesas.

- Erosión por raíces y animales
- Cambios de temperatura, ocasiona desintegración
- Liberación de esfuerzos o descompresión, esfuerzos naturales en la roca emplazada en la corteza terrestre.

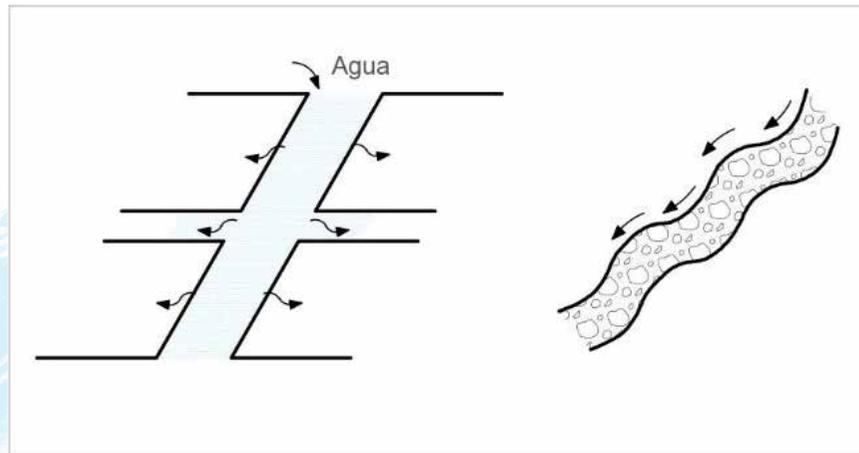


Figura 76. Factores de meteorización.
Fuente: Autores

Presión Litostática:

$$P_L = h \times G$$

Ecuación 43. Presión litostática

G= Densidad promedio ponderado de cada estrato.

h= Altura de estrato

$$G = \frac{F}{V}$$

Ecuación 44. Densidad promedio ponderado

$$P_L = L \frac{F}{L^3} = \frac{F}{L^2}$$

Ecuación 45. Presión litostática en función de la densidad

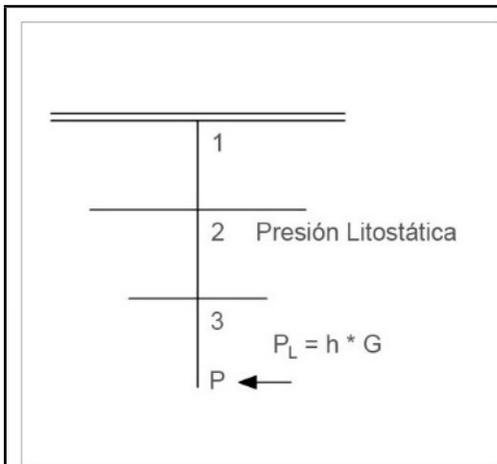


Figura 77. Presiones.
Fuente: Autores

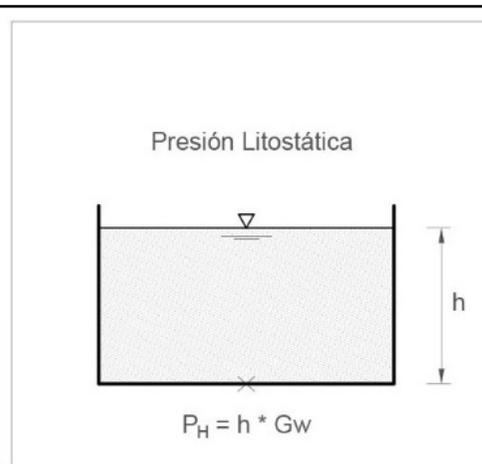


Figura 78. Presión litostática.
Fuente: Autores

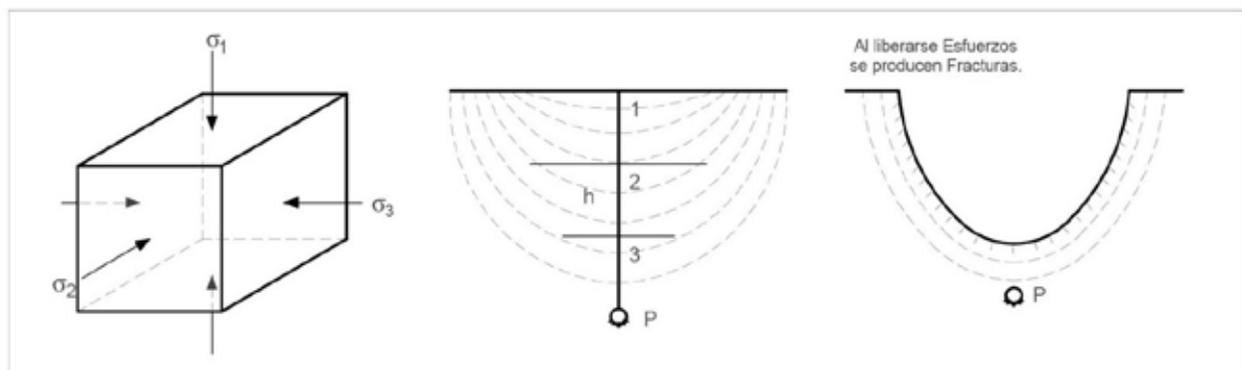


Figura 79. Presión en el suelo.
Fuente: Autores

Ejemplo

$$P_L = 1000 \text{ m} \times 2.5 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$$

$$P_L = 2500 \text{ T/m}^2$$

Se considera una columna con un intrusivo, en el intrusivo tendremos juntas de emplazamientos paralelos a la superficie y estos se encuentran con desplazamientos.

Las juntas superiores son producto de enfriamiento o de contracción.

Las juntas paralelas a la superficie topográfica son juntas de descompresión.
(Figura 80)

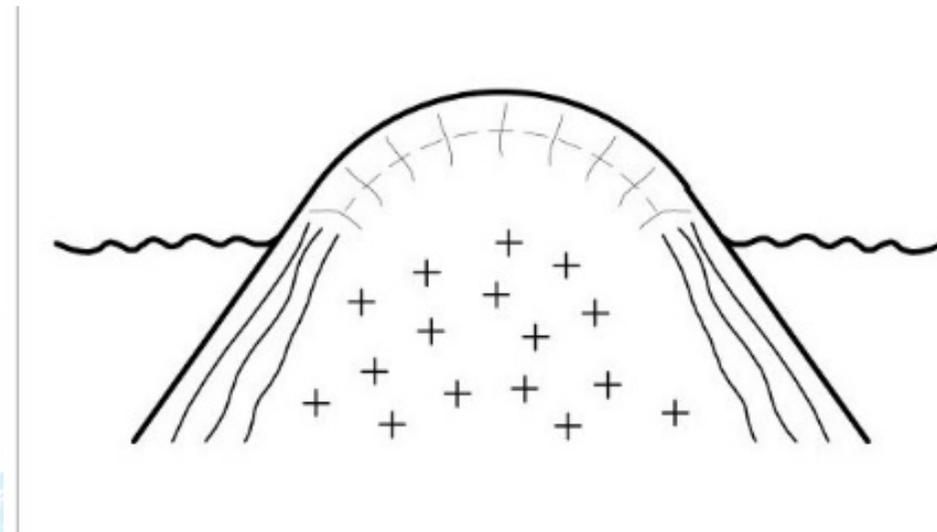


Figura 80. Juntas de compresión.
Fuente: Autores

Meteorización química

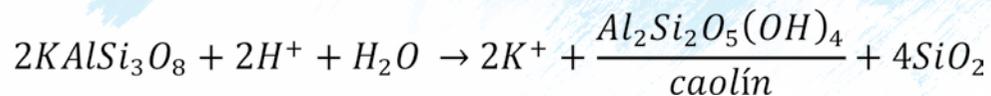
Descomposición o se presentan cambios minerales, consecuentemente es natural que aparezcan nuevos minerales e involucre a los agentes atmosféricos.

$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_3$ ácido carbónico, este se desintegra y forma un hidrogenión libre más HCO_3

$H_2O + CO_2 \rightarrow H^+(HCO_3)^-$ bicarbonato

Ejemplo:

Meteorización de los feldespatos: un feldespato Aluminio-Silicato y tratándose del potasio, feldespato ortoclasa $Al_2Si_2O_8(OH)_4$ que es el aluminio silicato hidratado.



Ecuación 46. Meteorización para feldespatos

Esta ecuación actúa en función del tiempo dentro del tiempo geológico.

Laterización

Formación de lateritas, suelo arcilloso, las lateritas es un suelo que contiene Fe (hierro). Su color es rojo amarillento en ambientes tropicales, muy característico por su contenido de humedad y los suelos lateríticos se

podría decir entonces, es producto de la laterización. Es una remoción del sílice por lixiviación o lavado, este proceso es tan intenso y profundo que lo único estable es:

Sexquióxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 que son insolubles

En un granito se tiene 60% - 65% de SiO_2 , viene el proceso de lixiviación y queda reducido a 5% - 15% en lateritas.

Esto también sucede en el basalto 55% de SiO_2 se remueve y baja.

La laterita es un pésimo material de construcción, puede absorber un 200% del peso de agua, es extremadamente compresible, es muy plástico y con gran cantidad de gases.

Para determinar el tipo de suelo (si es o no laterita), se hacen ensayos simples de:

1. Se toma una muestra de 5 kg de material y se realiza un análisis químico de óxidos

Tabla 14 Análisis químico de óxidos.

SiO_2	31.7%
Al_2O_3	31%
Fe_2O_3	19.0%
	81.7%

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

La diferencia de 81.7% hasta el 100% corresponde a materia orgánica.

2. Calculamos peso molecular

Tabla 15 Peso molecular.

SiO_2	$28.06 + 2(16.0) = 60.06$
Al_2O_3	$2(26.9) + 3(16.0) = 101.9$
Fe_2O_3	$2(55.89) + 3(16.0) = 159.7$

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

3. Unidades de reacción UR

Se divide el contenido para el peso molecular

Tabla 16 Unidades de reacción UR.

SiO_2	$\frac{31.7}{60.06} = 0.528$
Al_2O_3	$\frac{31}{101.9} = 0.304$
Fe_2O_3	$\frac{19}{159.7} = 0.119$

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

El SiO_2 se divide para la suma de los UR de los óxidos componentes

$$SiO_2 \div (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$$
$$\frac{0.528}{0.304 + 0.119} = \frac{0.528}{0.423} = 1.24$$

Es laterita.

Tabla 17 Clasificación.

<1.33	Es una laterita
1.33 – 2.0	Es una pseudolaterita
>2.0	No es laterita

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

Perfil de meteorización

Es un conjunto de varias capas en las que no ha ocurrido ningún fenómeno de transporte, todo es material autóctono, nada es transportado. Estas capas se caracterizan por el grado de meteorización, el siguiente modelo la aplicamos a las rocas ígneas y metamórficas. (Figura 81)

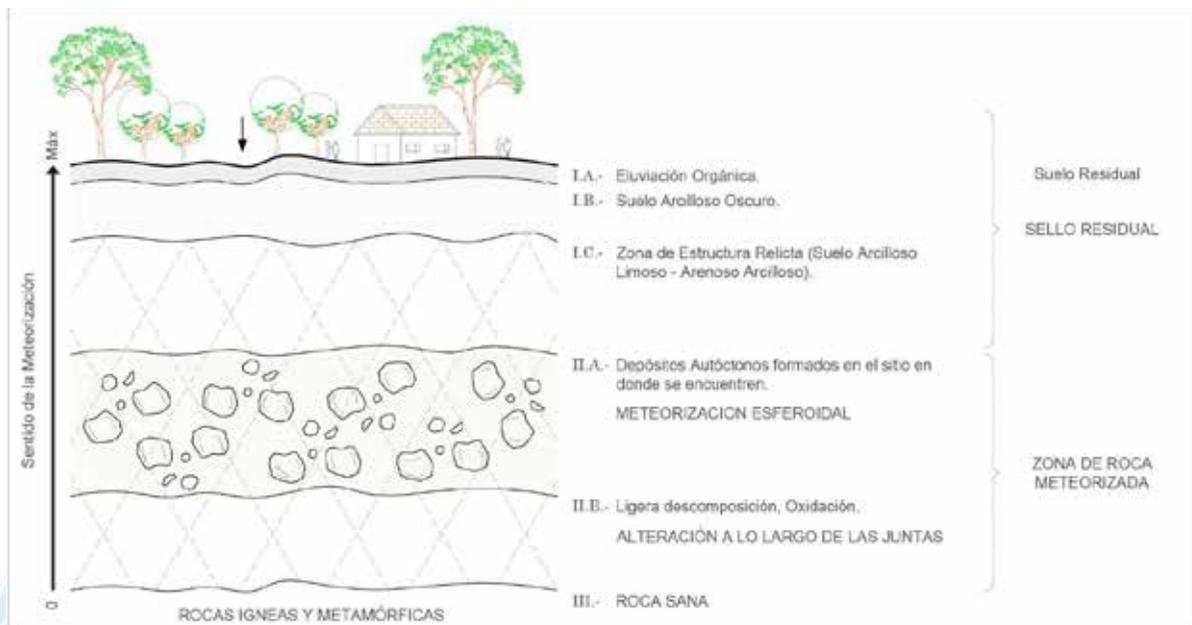


Figura 81. Perfil de meteorización.

Fuente: Autores

IA. Zona de meteorización, donde está alcanzando su máximo desarrollo, capa de eluviación orgánica, se sustenta la vida orgánica, el suelo vegetal tiene un espesor irregular, va de centímetros a pocos metros.

IB. Zona arcillosa: Capa de color oscuro arcilloso, café oscuro o marrón.

IC. Zona de estructuras relictas (estructura geológica conservada), es un suelo arenoso - limoso - areno arcilloso, existe una clasificación propuesta por Dire y Patton que consiste en un I suelo residual.

Un suelo residual es cuando la meteorización es perfecta y claramente manifiesta, es decir, la meteorización ha alcanzado sus máximos valores, la meteorización depende de las discontinuidades, estos facilitan la entrada de los agentes atmosféricos.

II. Zona de roca meteorizada: es la estructura de la roca que envuelve a la roca sana, existen estructuras concéntricas.

Sobre el plano, se deposita una película de óxido llamada zona de alteración a lo largo de las juntas.

III. roca sana, la meteorización crece de

Erosionabilidad de los suelos

La erosión en los suelos se produce por distintos fenómenos naturales

Determinación del grado de erosionabilidad en el suelo

Ensayo Pinhole

Norma: ASTM D4647

El ensayo consiste en colocar 3cm de grava en el cilindro compactador, seguido de 4 cm de la muestra de suelo compactado, separando la grava y el suelo por una malla N40.

En el borde de la muestra se coloca una válvula y se introduce una aguja calibrada de 1mm de diámetro, el espacio que deja la aguja en la muestra es por donde saldrá el agua posteriormente, se rellena el espacio restante del cilindro con grava separando la grava de suelo con una malla N40.

El cilindro compactador es sellado herméticamente colocado en sentido horizontal acoplándolo a un manómetro, el cuál proveerá agua durante el ensayo.

Se introduce agua destilada en el manómetro bajo cargas variables, usamos cargas de 50 mm, 180 mm, 380 mm y 1020 mm y se realiza la toma de los datos del caudal y la turbidez de agua saliente del cilindro. Estos datos nos permiten clasificar al suelo según las características de dispersividad. Véase la tabla adjunta.

Tabla 18 Criterios para la evaluación de resultados de prueba de Pinhole.

Clasificación	Carga de falla	Tiempo de prueba para la carga dada (min)	Velocidad de flujo final a través de la muestra (mL/s)	Claridad del fluido después de la prueba		Tamaño del orificio después de la prueba
				Costado	Arriba	
D1	50	5	1.0-1.4	Oscuro	Muy oscuro	≥ 2.0
D2	50	10	1.0-1.4	Moderadamente oscuro	oscuro	> 1.5
ND4	50	10	0.8-1.0	Ligeramente oscuro	Moderadamente oscuro	≤ 1.5
ND3	180	5	1.4-2.7	Apenas claro	Ligeramente oscuro	≥ 1.5
	380	5	1.8-3.2			
ND2	1020	5	> 3.0	Claro	Apenas claro	< 1.5
ND1	1020	5	≤ 3.0	Perfectamente claro	Perfectamente claro	1.0

Fuente: ASTM D4647

El flujo de arcillas dispersivas será claramente oscuro y el agujero a través de la muestra se ampliará rápidamente, con un aumento de la tasa de flujo. El flujo de ligero a moderado para arcillas dispersivas será ligeramente más oscuro con un tamaño de orificio constante y velocidad de flujo. El flujo de arcillas dispersivas será completamente claro, sin aumento considerable en el tamaño del agujero

Ensayo del Doble Hidrómetro

Norma: ASTM D422

El ensayo consiste en determinar el porcentaje de dispersión del suelo a través de pruebas con muestras de suelo tamizadas en una malla de 2.36mm de abertura, correspondiente al tamiz N° 8, las pruebas se realizan en dos probetas con agua destilada, la primera probeta con agitación mecánica y con dispersante; la segunda sin agitación mecánica y sin dispersante.

La relación para el cálculo de dispersión del suelo entre ambas probetas es:

$$\%D = \frac{\%A}{\%B} * 100$$

Ecuación 47. Dispersión del suelo

donde:

%D: porcentaje de dispersión

%A: porcentaje de suelos más finos que 0.005mm para el ensayo sin dispersante y sin agitación mecánica

%B: porcentaje de suelos más finos que 0.005mm para el ensayo con dispersante y con agitación mecánica.

Tabla 19 Criterio para la evaluación del grado de dispersión.

Porcentaje de Dispersión	Grado de Dispersión
<30	No dispersivo
30 a 50	Intermedio
>50	Dispersivo

Fuente: ASTM D4221

(Sherad, J.L y Decker, R.S, 1976) Señalan que los suelos con un porcentaje de dispersión mayor que el 50% son susceptibles a la dispersión y a las fallas

de tubificación en presas, y aquellos con un porcentaje de dispersión a las fallas de tubificación en presas, y aquellos con un porcentaje menor al 15% no son susceptibles a la dispersión.

FENÓMENOS DE LA GEODINÁMICA INTERNA

Riesgo volcánico y riesgo sísmico

- **V_a : valor monetario**, costos de los materiales de una obra, costo de la capacidad productiva
- **V_μ : vulnerabilidad**. Número concreto, porcentaje del valor que puede ser afectado por un factor, el mismo puede ir de 0 a 100%.
- **P_e : peligrosidad**. Representa la probabilidad de ocurrencia de un evento destructivo en un determinado sitio, dentro de un plazo determinado.

El plazo es un tiempo de amortización del valor de una obra, llamado también, vida útil de la obra.

Probabilidad no es un factor, no es un hecho determinado, depende de la calidad de los datos en un ejercicio estadístico. Es un factor que se escapa al control humano.

Aquí se utiliza el método de Cumbel que n es otra cosa que un método de cálculo probabilístico.

Al tener V_μ y P_e valores altos, el único que nos ayuda a controlar es la vulnerabilidad, siendo el único factor que intentará disminuir el riesgo

$$\text{Riesgo} = V_a \times V_\mu \times P_e$$

- Terremotos y/o tsunamis
- Erupciones volcánicas
- Huracanes
- Movimiento de masas
- Inundaciones

Riesgo natural

<input type="checkbox"/> Terremotos y/o tsunamis <input type="checkbox"/> Erupciones volcánicas <input type="checkbox"/> Huracanes <input type="checkbox"/> Movimiento de masas <input type="checkbox"/> Inundaciones	+ Población	= riesgo natural
---	-------------	------------------

Los fenómenos se caracterizan principalmente por su período de ocurrencia, por ejemplo las erupciones volcánicas tienen su período de recurrencia.

Desastre: es un evento destructivo, cuyos efectos negativos ocasionan pérdidas que sobrepasan la capacidad de respuesta de la sociedad.

Riesgo controlable: es aquel que favorece la intervención humana, aquí están por ejemplo las que derivan de terremotos de baja y media intensidad (energía). Se controla los efectos de los terremotos a través de la ingeniería sismoresistente.

Riesgo incontrolable: no puede ser evitado ni controlado por la intervención humana, ejemplo: los terremotos de alta energía.

Riesgo aceptable: de por medio se encuentra una decisión política, se analiza el máximo valor de daños que se puede aceptar.

Riesgo sísmico

El vulcanismo y la sismicidad están entrelazados por la tectónica global. Los sismos ocurren solo en los bordes activos de las placas que es donde existe la subducción y están muy relacionadas con el vulcanismo.

Epicentro: es un punto en la superficie del terreno en la que se siente los mayores efectos “terremotos”, están ubicados verticalmente sobre el foco.

Magnitud: energía liberada por el sismo. En el Ecuador ocurren sismos en todas las regiones con excepción de Manabí y al este en Aguarico.

Nido sísmico: lugar geográfico en donde frecuentemente se producen terremotos, por ejemplo El Puyo.

Profundidad de foco: (h) distancia vertical entre la superficie del terreno y el foco.

Profundidad de foco hipocentro: lugar donde se libera la energía en forma de ondas mecánicas. (Figura 82)

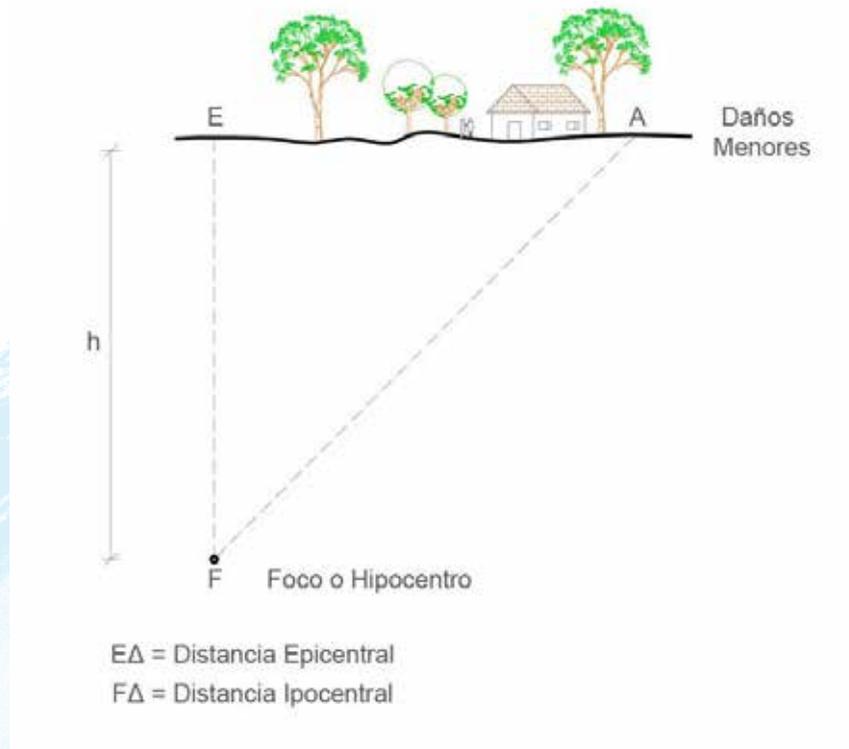


Figura 82. Profundidad del Epicentro.
Fuente: Autores

h = profundidad focal
 EA = distancia epicentral
 F = Hipocentro o foco
 E = epicentro
 FA = distancia hipocentral.
 Profundidad tipo de sismo

Tabla 20 Profundidad focal de sismos.

0- 50 km	Sismo superficial
50 – 150 km	Sismo intermedio
>150 km	Sismos profundos

Los sismos superficiales son los más destructivos, poca profundidad y alta energía.

Los parámetros que intervienen en mayor importancia para definir la peligrosidad de un sismo son la magnitud y la profundidad.

El efecto fundamental de la sismotectónica es averiguar el lugar en donde se generan los sismos, es decir, las zonas sismogénicas.

Zonas sismogénicas: estas zonas se obtienen relacionando la tectónica global con los hipocentros, las principales zonas en el país son:

- En la costa: debido a la fosa oceánica
- En la región interandina: debido a las fallas continentales
- En la zona de cabalgamiento: debido a la fallas transcurrentes del borde continental de los Andes.
- Por último la zona referido al Ecuador en el Plano de Benniof, serán superficiales, cerca de la costa y profundidades de la Amazonía.

El movimiento de una falla ocurre en la dirección de los esfuerzos normales, en base a esto podemos determinar las orientaciones focales.

Para poder representar los niveles de energía, se utiliza las *isosistas*.

Magnitud e intensidad

Magnitud: refleja la energía liberada por el sismo, es un parámetro único invariable, que se lo determina en el foco, expresado en unidades de energía. Para representar la magnitud se utiliza la escala de Richter (1,,3,4,5,6,7,8,9)

Se utiliza sismógrafos normalizados, los cables deben estar a cierta distancia del epicentro. Richter fijó una distancia epicentral de 60 millas. (Figura 83)

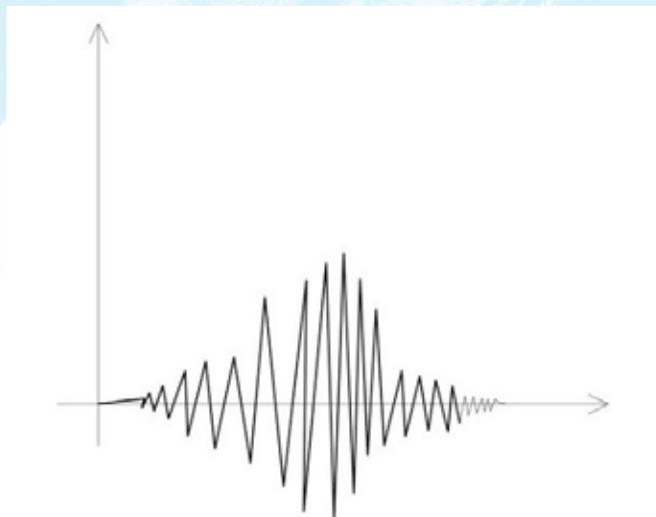


Figura 83. Escala de Richter.

Fuente: Autores

Se la chequea en segundos de onda epicentral con la hora epicentral.
GMT 11h 15'35" (TU) tiempo universal
06h 15'35" (LT) tiempo local

Se determina la máxima amplitud de la onda mayor, se mide con una regla en centímetros y se convierte a micras

$$1\text{cm} \rightarrow 10^4 \text{ micras}$$

El sismógrafo deberá ser WOOD, pues estos miden en escala Richter.

El logaritmo de base 10 de dicho número constituye la cifra de la escala hasta que se ha registrado la magnitud.

Se mide 10 cm = 10^3 micras, el logaritmo natural es 5, a este valor se lo puede confundir con la intensidad.

Área de ruptura-magnitud

$$M = \log A + 4.15$$

Ecuación 48. Magnitud en función del área de falla

Donde:

M: es la magnitud

A: área de la falla en

Longitud de falla-magnitud

$$\log L = 0.7M_s - 3.24$$

Ecuación 49. Longitud de falla

Donde:

L: longitud

Ms: magnitud

Desplazamiento superficial-magnitud

$$\log D = -4.31 + 0.651M_s$$

Ecuación 50. Longitud superficial

Donde:

D: desplazamiento

Ms: magnitud

Intensidad: medida o valor subjetivo, refleja los daños causados por la liberación sísmica o de confianza del sentido.

Escala de intensidad Mercalli Modificada

La escala inicial fue propuesta en 1931 ha sufrido 2 modificaciones, esta tiene 12 grados y se utiliza en número romanos del I al XII.

Esto se determina a través de las observaciones sensoriales del evento (isosistas).

Las *isosistas* son líneas que unen puntos de igual intensidad sísmica.

Una vez definida la intensidad, los parámetros serán

Tabla 21 Parámetros sísmicos.

Parámetros sísmicos	Aceleración	$A=L/T^2$	Es más importante este en función de la gravedad
	Velocidad	$V=L/T$	
	Desplazamiento	$D=L$	

La aceleración en el suelo es el más importante, y está en función de la gravedad, por ejemplo 0.10g, 0.25g, 0.50g, 0.85g, 1.15g. Para comprender, una aceleración de 1g en la construcción podría entenderse como la construcción de un edificio horizontalmente en un acantilado. (Figura 75)

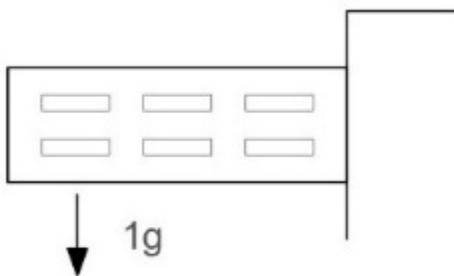


Figura 75 Edificio en el acantilado

Fuente: Autores

Tabla 22. Escala de intensidad Mercalli Modificado

I	no sentido
II	Sentido por personas en posición de descanso, en pisos altos o situación favorable.
III	Sentido en el interior. Objetos suspendidos oscilan, vibraciones como si pasara un camión ligero. Duración apreciable, puede no ser reconocido como un terremoto.
IV	Objetos suspendidos oscilan, vibraciones como el paso de un camión pesado, o sensación de sacudida, como un balón pesado golpea las paredes. Automóviles parados se balancean, ventanas, platos, puertas vibran. Los cristales tintinean, los cacharros de barro se mueven. Los tanques y armazones de madera crujen
V	Sentido al aire libre. Se aprecia la dirección. Los que están durmiendo se despiertan. Los líquidos se agitan, algunos se derraman. Objetos pequeños inestables se desplazan o vuelcan. Las puertas se balancean, se cierran o abren. Contraventanas y cuadros se mueven, los péndulos de relojes se paran, cambian de período.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. La gente anda inestable. Ventanas, plato y objetos de vidrio se rompen. Adornos, libros, etc. Caen de las estanterías. Los cuadros se caen, los muebles se vuelcan. Los revestimientos débiles y las construcciones tipo D2 se agrietan. Las campanas pequeñas suenan (iglesias, escuelas). Árboles y arbustos sacudidos visiblemente.
VII	Difícil mantenerse en pie, sentido por los conductores. Objetos suspendidos tiemblan. Muebles rotos, daño en edificios tipo D incluyen grietas las chimeneas débiles se rompen a ras de tejado, caída de cielos rasos, ladrillos sueltos, piedras, tejas, cornisas, edificios de tipo C. olas en los estanques, agua enturbada con barro. Pequeños corrimientos y hundimientos en arenas o montones de grava. Canales de cemento para regadíos se dañan.
VIII	Conducción de los coches afectada. Daños en edificios tipo C. colapso parcial, algún daño a edificios tipo B, nada en edificios tipo A. caída de estuco y algunas paredes de mampostería. Giro y caída de chimeneas, rimeros de fábricas, monumentos y torres, depósitos elevados. La estructura de las casas se mueve sobre los cimientos si no están sujetas, trozos de pared se sueltan, arrancados. Las ramas de los árboles se rompen. Cambios en el caudal y la temperatura de fuentes y pozos. Grietas en suelos húmedos y pendientes fuertes.
IX	Pánico general. Construcciones de tipo D destruidas, edificios tipo C, seriamente dañados, algunos con colapso total, edificaciones tipo B con daños importantes. Daños generales en los cimientos. Estructuras de almacén, si no están sujetas se desplazan de los cimientos, armazones arruinados, daños serios a embalses, tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. Eyección de arena y barro, aparecen fuentes y cráteres de arenas.

X	La mayoría de estructuras de almacén destruidas, con sus cimientos. Algunos edificios bien contruidos en madera y puentes, destruidos. Daños serios en presas, diques, terraplenes. Grandes corrimientos de tierra. El agua rebosa las orillas de los ríos, canales, lagos, etc. Arena y barro desplazados horizontalmente en playas y tierras llanas, carriles torcidos.
XI	Carriles muy retorcidos, tuberías subterráneas totalmente fuera de servicio.
XII	Daño total. Grandes masas de roca desplazadas, visuales y líneas de nivel deformadas. Objetos proyectados al aire.

Construcciones A,B,C,D; para no entrar en ambigüedad del lenguaje, la calidad de construcciones, ladrillo u otro material, se especifican por las siguientes letras:

- A:** estructuras de acero y hormigón bien diseñado, calculado para resistir fuerzas laterales. Buenas construcciones y materiales de primera calidad.
- B:** estructuras de hormigón armado, no diseñadas en detalle para poder resistir fuerzas laterales, buena construcción y de un solo material.
- C:** estructuras no tan débiles como para fallar en la unión de las esquinas, pero no reforzadas ni diseñadas para resistir fuerzas horizontales, construcción y materiales corrientes.
- D:** construcción de material pobre, tales como adobe, baja calidad de construcción. No resiste fuerzas laterales.

Geometría de las fuentes sísmicas

Las fuentes sísmicas son los sitios de la corteza terrestre donde se pueden generar sismos, existen las fuentes sísmicas areales y fuentes sísmicas lineales. (Figura 84 y 85)

Fuentes sísmicas areales: los epicentros registrados no coinciden con una línea sino que se distribuyen a lo largo de una región.

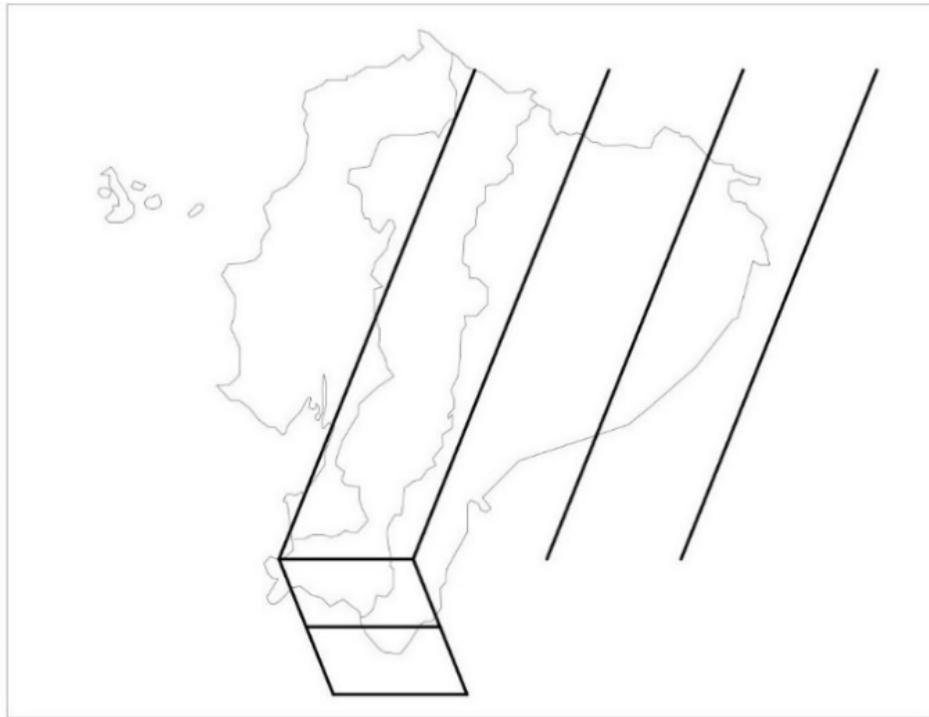


Figura 84. Geometría de las fuentes sísmicas.
Fuente: Autores

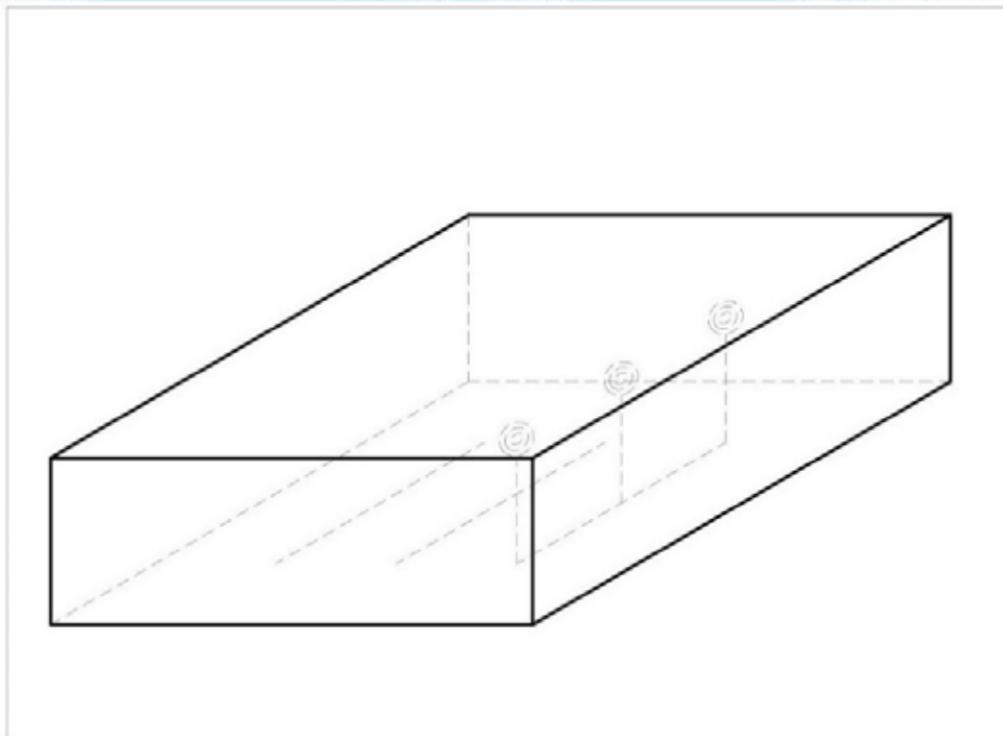


Figura 85. Geometría de las fuentes sísmicas.
Fuente: Autores

Fuentes sísmicas lineales: las fuentes sísmicas lineales, los epicentros y más los hipocentros coinciden con una línea. (Figura 86 y 87)

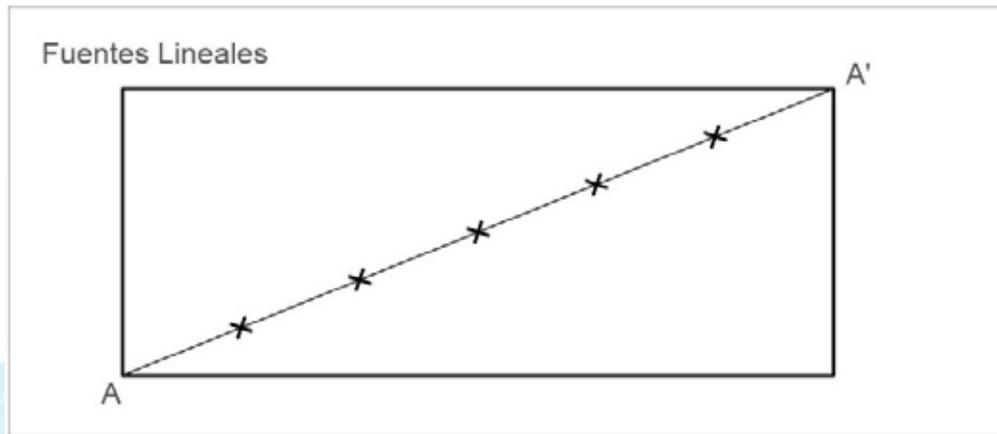


Figura 86. Fuentes lineales.
Fuente: Autores

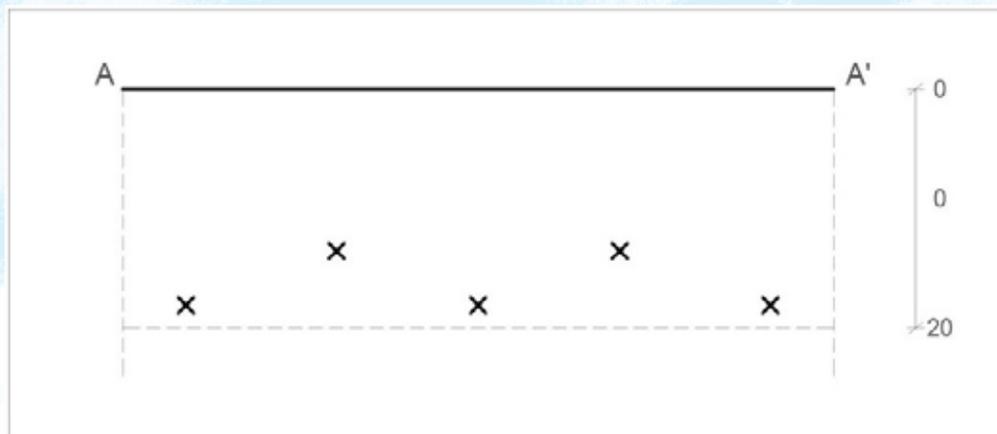


Figura 87. Fuentes lineales.
Fuente: Autores

Un terremoto se origina en el foco y se propaga con una serie intermitente de vibraciones a lo largo de una zona de fallas, la energía total del foco se puede determinar con la longitud de la zona fallada y se puede determinar la magnitud.

M= magnitud sísmica

A y B= constante obtenida por regresión

L= longitud de la zona fracturada.

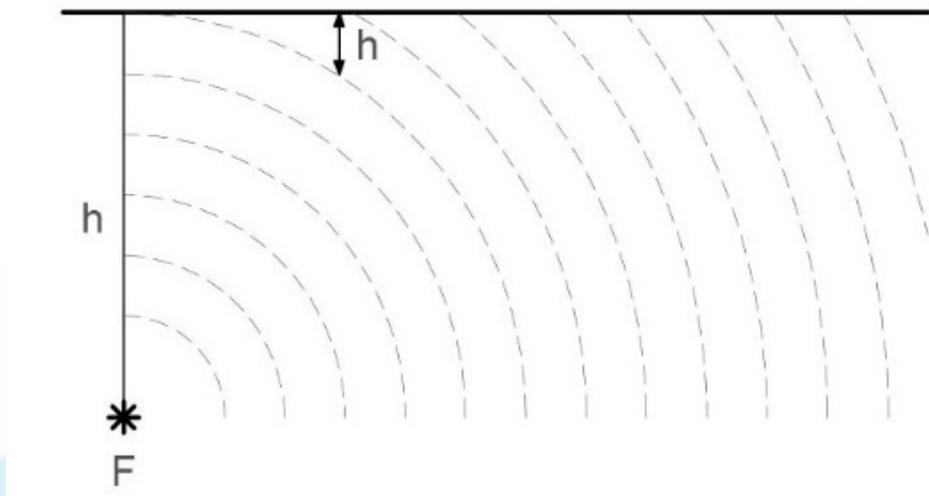


Figura 88. Curva F-h.
Fuente: Autores

Peligro sísmico: tenemos la escala máxima que puede esparcirse

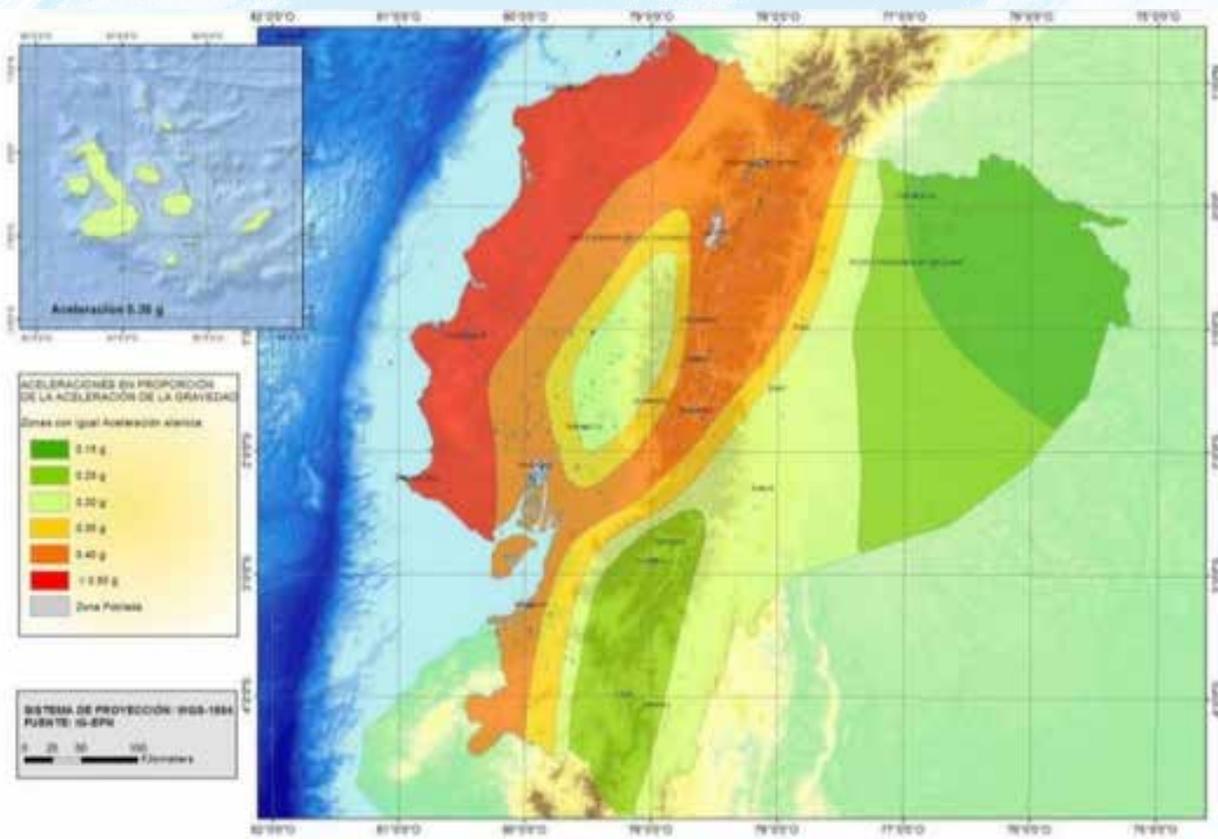


Figura 89. Mapa de zonificación de peligro sísmico, valores de Z.
Fuente: NEC-SE-DS Peligro sísmico

Tabla 23 Valores de factor Z n función de zonificación sísmica.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: NEC-SE-DS Peligro sísmico

Riesgos naturales

En la ciudad de Quito se ha organizado ya el plan de riesgos naturales.

Terracemiento: se lo emplea de acuerdo a la granulometría del material del suelo.

Si el suelo tiene una suficiente proporción de limos y arcillas, este se utiliza con menos cemento.

El problema es el diseño de la traba para darle mayor característica a cada pared, se hace un pequeño zócalo de cemento.

En una pared de mampostería, para darle mayor característica de resistencia al terreno se coloca una plataforma de hormigón. (Figura 90)

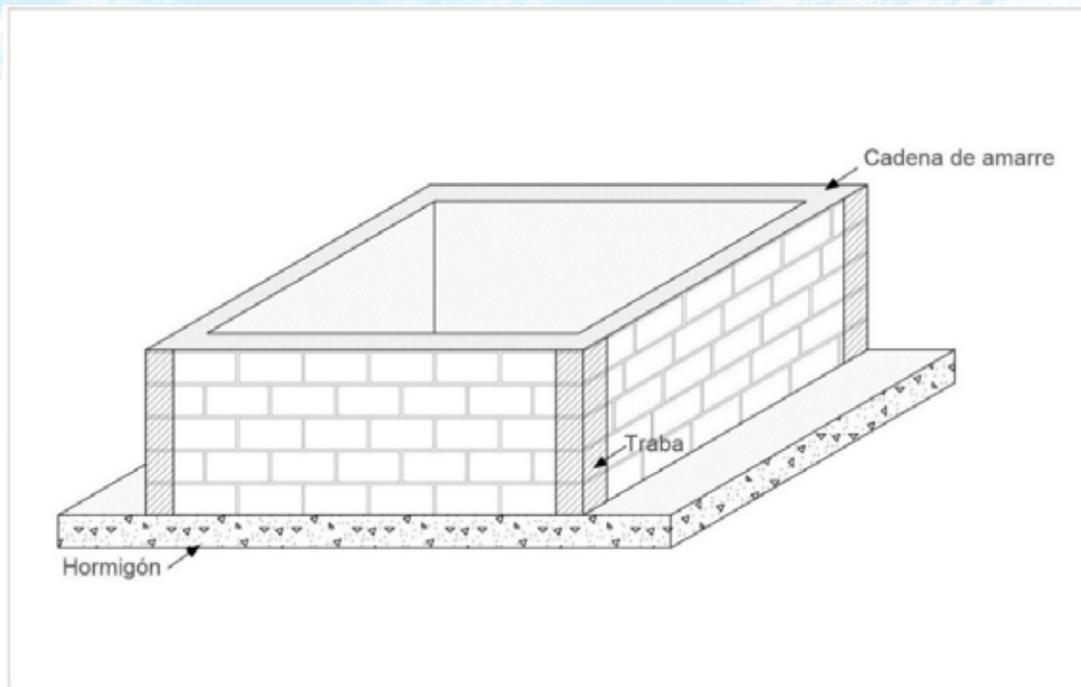


Figura 90. Riesgos naturales.
Fuente: Autores

Métodos geofísicos (ubicación de la línea de roca)

- Se pretende ubicar la línea de roca
- Localización del nivel freático
- Estratigrafía
- Calidad de los minerales

Entonces, explicando cada paso se tiene:

- En una pendiente cualquiera, nos interesa encontrar la línea de roca o Roca Sana.
- Localizar el nivel freático, existen tres posibilidades:
 - El nivel freático en medio de la roca alterada.
 - El nivel freático en la base de la cuña
 - Nivel freático bajo el contacto.
- La estratigrafía asumimos las distintas capas superpuestas A,B,C. (Figura 91)

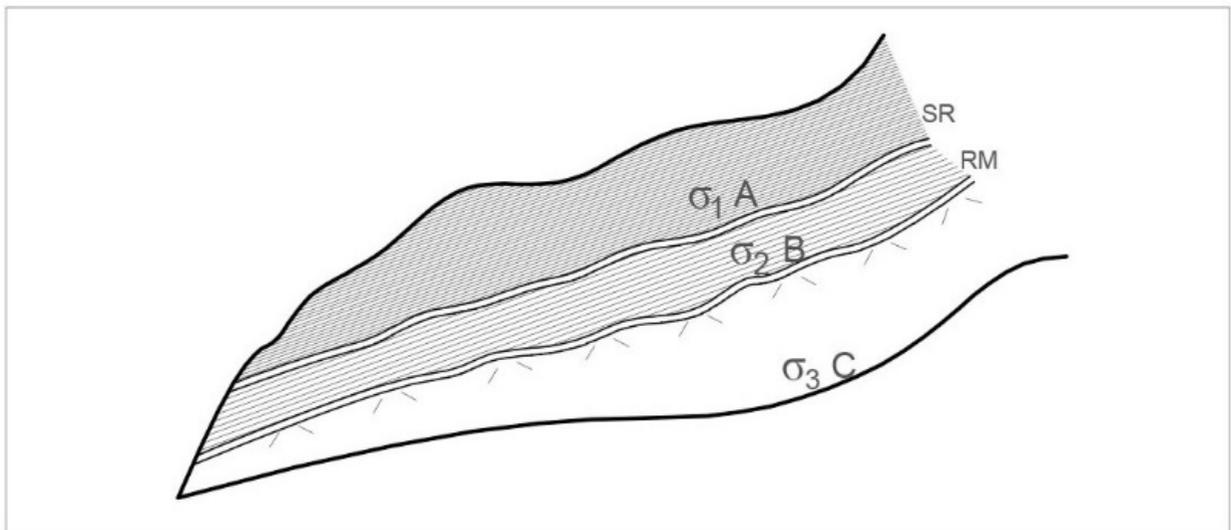


Figura 91. Estratigrafía.
Fuente: Autores

El módulo elástico dinámico está sustentado en la velocidad de ondas longitudinales P_o transversales V_p e interpretar la estratigrafía.

Los métodos geofísicos: son una herramienta para la exploración del subsuelo y esta se la puede hacer básicamente de dos formas: directa e indirecta.

Indirecta: la forma indirecta constituye los métodos geofísicos, pues no se está en contacto con el subsuelo y solo se infiere, se interpreta.

Directa: la forma directa se lo hace en base a perforaciones con recuperación de testigos y a través de galerías exploratorias. En forma indirecta utilizamos la sísmica de refracción y la resistencia eléctrica.

Sísmica de refracción: consiste en medir las ondas sísmicas generadas artificialmente por explosiones. Estas generan ondas físicas que viajan por el suelo, y al chocar con un límite, se refractan.

Para que las ondas se refracten, es necesario que el segundo medio sea más denso que el primero $V_2 > V_1$. (Figura 92)

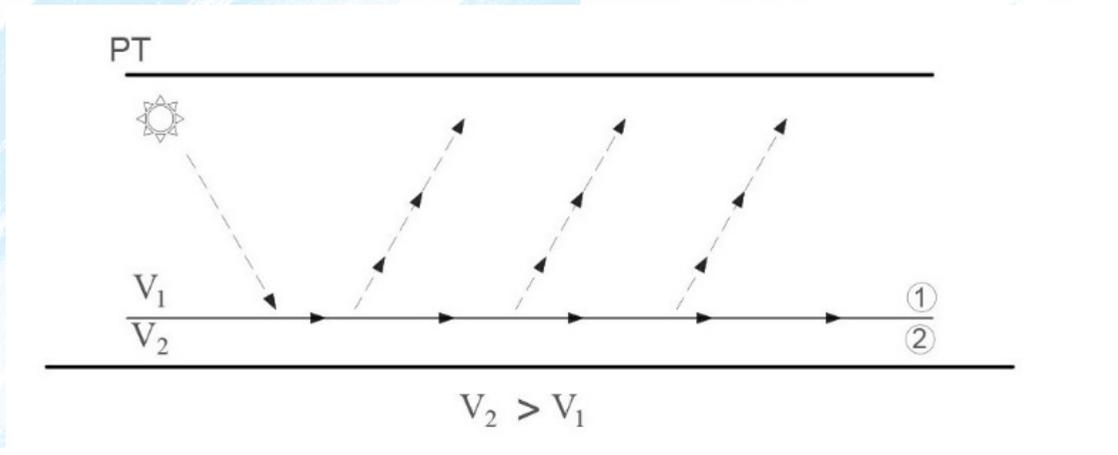


Figura 92. Sísmica de refracción.
Fuente: Autores

Para esto se tiene las ondas Love y las ondas Raileign.

Tabla 24 Tipos de ondas.

Ondas superficiales	Ondas longitudinales	Ondas transversales	Velocidad de ondas de corte	Velocidad de ondas sísmicas
Love	P	S	Vs30	Vp
Raileign				

Es necesario para determinar las ondas Love y Raileign, para esto determinamos el tiempo que necesita la onda para viajar y se conecta con el arribo mediante los geofomas y recoge la señal cuando arriban las ondas, el equipo para realizar este ensayo consta básicamente de:

1. Un mecanismo de generación de la onda (detonación o carga explosiva)
2. Mecanismo de detección de la onda (geófono)
3. Mecanismo de registro (o registro de onda)



Figura 93. Geófonos.

Fuente: Laboratorio de ensayo de materiales ESPE-UFA

Geófono: está constituido por una cascara resistente, una punta para anclar en el piso, dentro se encuentra un imán permanente: una bobina, un resorte, cables. (Figura 93)

Cuando llega la onda se produce una perturbación por medio de los resortes, pasa a tener contacto con la bobina y genera una corriente, esta vibración del suelo hace que se genere una pequeña corriente eléctrica que hace que se genere hacia afuera.

Los geófonos son dispositivos eléctricos que convierten la energía mecánica en impulsos eléctricos. Generalmente se utilizan para determinar las ondas P.

Sismógrafo: el objeto registrador es un sismógrafo que en realidad es un oscilógrafo de mecanismo constante y tiene como instrumentos sensibles a los galvanómetros, los cuales registrarán y detectarán el arribo de la corriente eléctrica. (Figura 94)

Para cada uno de los sismógrafos tendremos un canal, un aparato de 6 geófonos, y tiene que existir siempre una escala de tiempos y tiene que estar en milisegundos. (Rango temporal)

Lo que se debe hacer es la medición del tiempo de arribo a cada geófono y segundo tiro, con los datos obtenidos se realiza la curva dromocrómica, que es un gráfico tiempo-distancia. (Figura 95)

Distancia crítica es aquella en la que ocurre un cambio de pendiente, se puede determinar la línea de la roca.

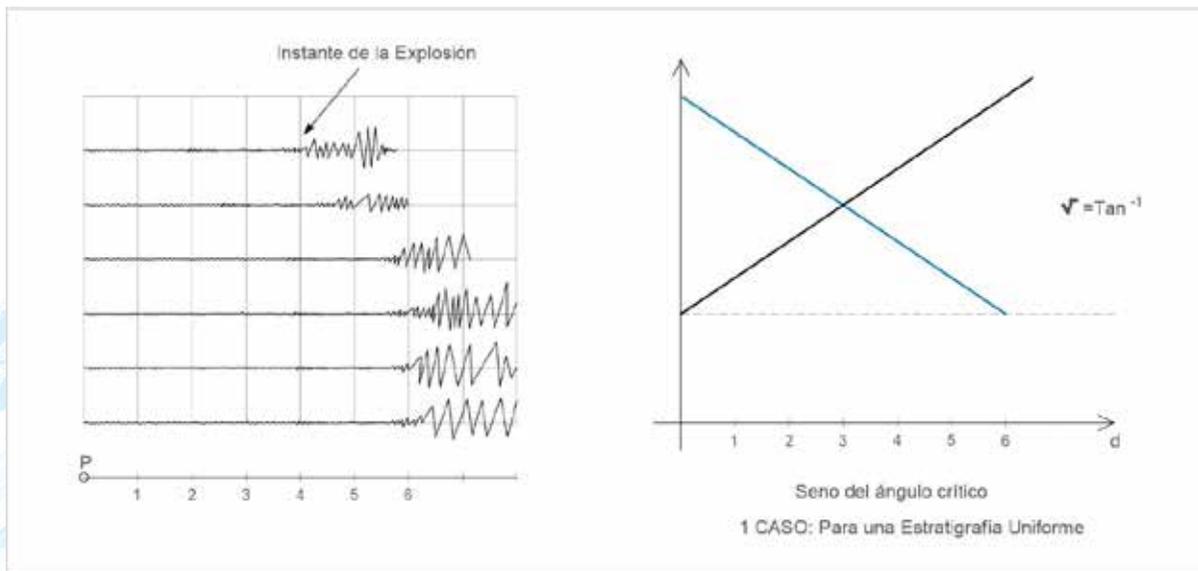


Figura 94. Sismógrafo.
Fuente: Autores

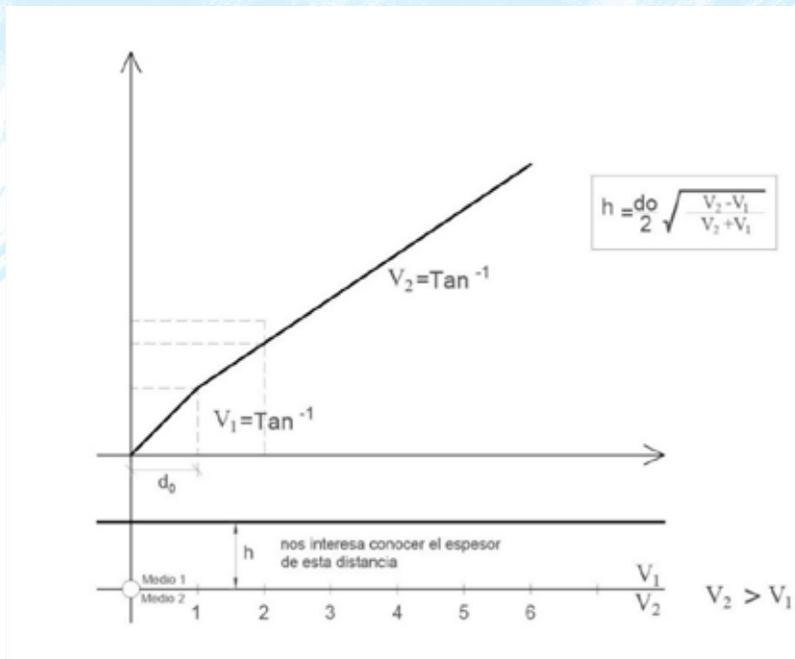


Figura 95. Sismógrafo, tiempo distancia.
Fuente: Autores

- Se puede determinar la línea de roca.
- Este método no se puede utilizar cuando el nivel freático está de por medio.
- Se puede establecer la presencia de algunas capas.
- La calidad de los materiales, se la realiza por comparación. Se puede inferir un comportamiento de los materiales.

Tabla 25. Velocidad de ondas sísmicas según su material.

Material	Velocidad V_p de ondas sísmicas (m/s)	
Suelo artificial	1700	500
Arcilla	1000	2000
Arcilla arenosa	975	1160
Limo		760
Aluvión	550	1000
Depósito glacial (Morrena)	490	1700
Agua	1435	1470

Velocidad de ondas de corte V_{s30}

Su valor se obtiene por medio de:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

Ecuación 51. Velocidad de ondas de corte

Donde:

V_{si} : Velocidad media de la onda de cortante del suelo del estrato q . medida en campo, (m/s)

d_i : Espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 superiores del perfil

Ripabilidad (Ripper) desgaste:

Posibilidad de desgastarse que tiene un suelo, se lo realiza por medio de la uñeta trasera de un tractor.

Para la construcción de carreteras, se debe utilizar como medio de determinación de ondas sísmicas en lo ripable, se determina la transmisión y luego se toma como referencia unas tablas en las que se encuentra la ripabilidad de los terrenos.

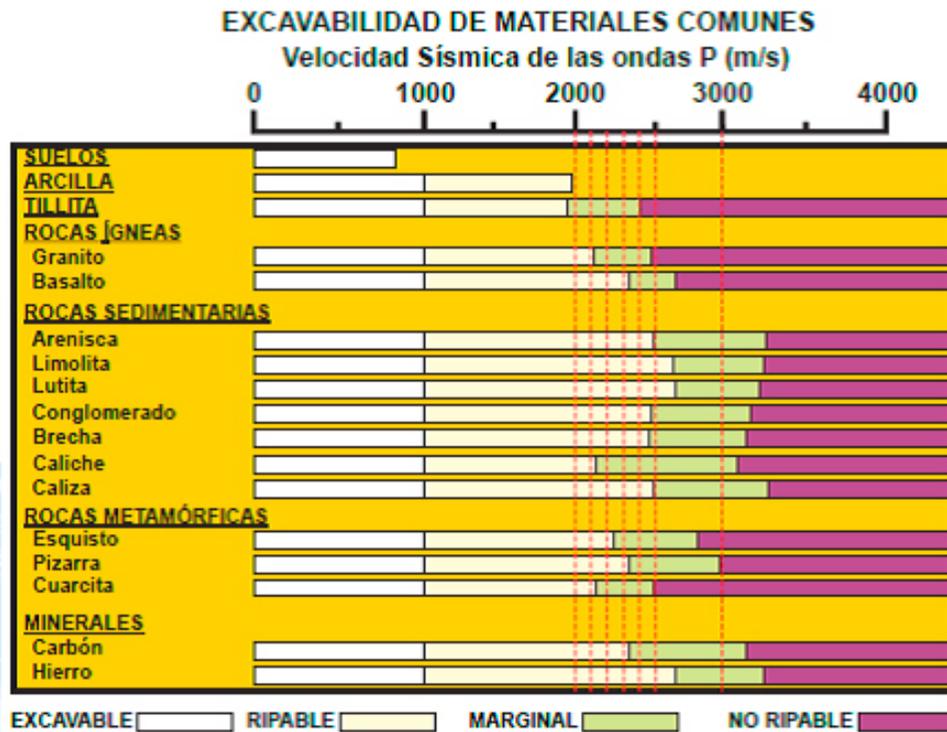


Figura 96. Tabla de ripabilidad basada en la maquina D-10R de Caterpillar.
Fuente:(Hunt, 1986)

Resistividad eléctrica

Sondeo eléctrico vertical SEV

El método de estudio geofísico define el contacto entre tipos de suelos, identifica formaciones hidrogeológicas y determina la profundidad de rocas sanas en la zona ensayada.

Consiste en realizar mediciones superficiales tomadas a través de la diferencia de potencial de dos electrodos, generada por la inyección de corriente eléctrica de otro par de electrodos, los resultados nos proporcionan el análisis de la resistividad eléctrica aparente del suelo en función de la profundidad, representada en una curva.

Disposición de Schlumberger

Es un tipo de alineación de los electrodos que permiten determinar la resistividad eléctrica aparente. La alineación correspondiente. (Figura 97)

DISPOSITIVO TETRAELECTRÓDICO SCHLUMBERGER

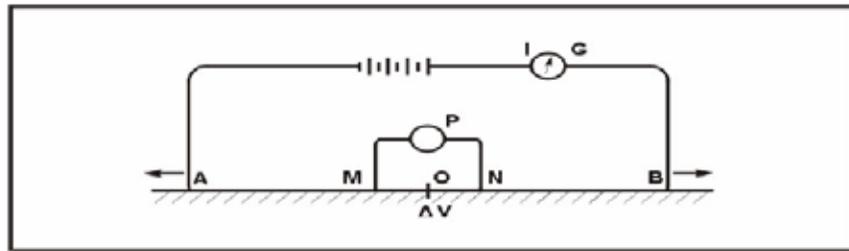


Figura 97. Dispositivo tetraelectrónico Schlumberger
Fuente: Instituto Geominero de España

La profundidad que alcanza a corriente aumenta a medida que aumenta A-B

La resistividad aparente según la disposición de Schlumberger se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{\pi}{4 MN} * (AB^2 - MN^2) * \frac{\Delta V}{I}$$

Ecuación 52. Resistividad aparente

Método Magnetotelúrico MT

El método determina las propiedades geoelectricas del subsuelo mediante fluctuaciones temporales del campo electromagnético natural generadas en la ionosfera. Establece las relaciones específicas entre las componentes del campo eléctrico y las componentes del campo magnético.

Se realiza en áreas donde los levantamientos sísmicos son dificultosos por presencia de rocas volcánicas en la superficie o cerca de esta; o casos donde la topografía del lugar no es favorable, y a diferencia al método SEV, el método MT puede alcanzar mayores profundidades de sondeo.

A través de este método podemos definir el contactos entre los materiales del subsuelo, detección del substrato rocoso, detección del nivel freático, identificación de zonas fracturadas y discontinuas, localización de zonas contaminadas con lixiviados, estudios geotérmicos, etc. (Cataluña, 2014)

Resistividad-profundidad

$$h = \sqrt{\frac{\rho_a(T)T}{2\pi\mu_o}}$$

Ecuación 53. Profundidad de resistividad

La resistividad “Bostick”, $\rho_B(h)$, a profundidad h se da por:

$$\rho_B(h) = \rho_a(T) \frac{1 + m(T)}{1 - m(T)}$$

Ecuación 54. Resistividad Bostick

Donde:

$m(T)$ es la gradiente de la resistividad aparente curva en una escala log-log.

$$m(T) = \frac{d \log(\rho_a(T))}{d \log(T)} = \frac{T}{\rho_a(T)} \frac{d\rho_a(T)}{dT}$$

Ecuación 55. Resistividad aparente

La transformación “Niblett” da una conductividad a una profundidad desde

$$\sigma_N(h) = h \frac{d\sigma_a(T)}{dh} + \sigma_a(T)$$

Ecuación 56. Transformación Niblett

Donde:

$\sigma_a(T) = \frac{1}{\rho_a(T)}$. Evidentemente;

$$\sigma_N(h) = \sqrt{\frac{\rho_a T}{2\pi\mu_o}} \frac{d\left(\frac{1}{\rho_a}\right)}{d\sqrt{\frac{\rho_a T}{2\pi\mu_o}}} + \frac{1}{\rho_a} = \sqrt{\rho_a T} \frac{d\left(\frac{1}{\rho_a}\right)}{d\sqrt{\rho_a T}} + \frac{1}{\rho_a}$$

Ecuación 57. Transformación Niblett en función de la profundidad

(Depende de ρ_a para asumir T) que, después de la diferenciación de las partes se convierte en

$$\sigma_N(h) = \frac{-2T}{\rho_a \left(T + \rho_a \frac{dT}{d\rho_a} \right)} + \frac{1}{\rho_a}$$

Ecuación 58. Ecuación de Niblett reducida en función de la profundidad

Por lo tanto, $\sigma_N(h) = 1/\sigma_N(h)$ esta dado por

$$\sigma_N(h) = \rho_a(T) \frac{\left(1 + \frac{T}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dT} \right)}{\left(1 - \frac{T}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dT} \right)} = \rho_a(T) \frac{1 + m(T)}{1 - m(T)}$$

Ecuación 59. Ecuación de Niblett reducida en función de la profundidad y el gradiente de resistividad

Entonces, $\rho_B(h) = \rho_N(h)$ para todas las profundidades h.

(Alfonso Muñoz Martin) han presentado previamente una forma de la transformación Niblett, que implica la estimación del gradiente de $\log(\rho_a(T))$ frente $\log(\sqrt{T})$, que después de la manipulación simple, ahora puede ser reconocida como también exactamente equivalente a la transformación Bostick.

Una expresión alternativa para la resistividad Bostick a profundidad h ha sido utilizada por diversos Autores por ejemplo, (Weidelt et al, 1980); (Rotstein, Goldberg and, 1982). Esta forma, dada por:

$$\tilde{\rho}_B(h) = \rho_a(T) \left(\frac{\pi}{2\Phi(T)} - 1 \right)$$

Ecuación 60. Ecuación de Niblett alternativa

Emplea la información de fase(T) y se relaciona con el original por “fase aproximada” (P. Weidelt et al, 1972). La expresión anterior tiene la ventaja de no requerir una estimación de m(T) para ser realizada, pero $\tilde{\rho}_B(h) \neq \rho_B(h)$ y por lo tanto $\tilde{\rho}_B(h) \neq \rho_N(h)$.

Resistividad de varios tipos de rocas y suelos

Tabla 26 Resistividad según el tipo de material.

Material	Resistividad (OHM-m)	
Granito	1 x 10 ⁶	
Diorita	1 x 10 ⁴	
Gabro	1 x 10 ⁵	1.4 x 10 ⁷
Metamórficas Gneiss	2 x 10 ⁶	3 x 10 ⁶
Areniscas	7 x 10	7 x 10 ³
Caliza	1.8 x 10 ²	
Arena (suelo)	2.2 x 10 ²	4 x 10 ²
Suelos en general	10	1 x 10 ⁴
Pirita	1 x 10 ⁻³	
Calena	5 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻²

Tipos de actividad volcánica

Existen dos tipos:

Efusiva: se caracteriza por un alto contenido de agua y bajo contenido de, es decir baja viscosidad. Es un magma fluido con poca energía cinética, contiene volátiles que forman burbujas y luego fluyen como un caldo o colada.

Las características del flujo dan tiempo a intervenciones humanas.

Actividad explosiva: el magma es caracterizado porque tiene alto contenido de agua y alto contenido de sílice, por lo tanto tiene alta densidad y alta energía cinética. Genera columnas trifásicas (sólido, líquido y gaseoso) que se van expandiendo y liberan gases, se incrementa el grado de explosividad.

Sólidos: pedazos arrancados del cono, magma solidificado; líquidos, gases. Cuando pierde empuje, colapsan y viajan pegados a la superficie con velocidades muy altas.

Primero el material es ascendido por fusión (jet), luego el material sube por convección, a al terminar su empuje, esta asciende y forma una nube ardiente 700 a 800 °C viajando luego por la superficie con velocidades de hasta 200 km/h.

Al terminar la columna su energía jet, eta colapsa. Se tiene lluvia de ceniza, cae fría.

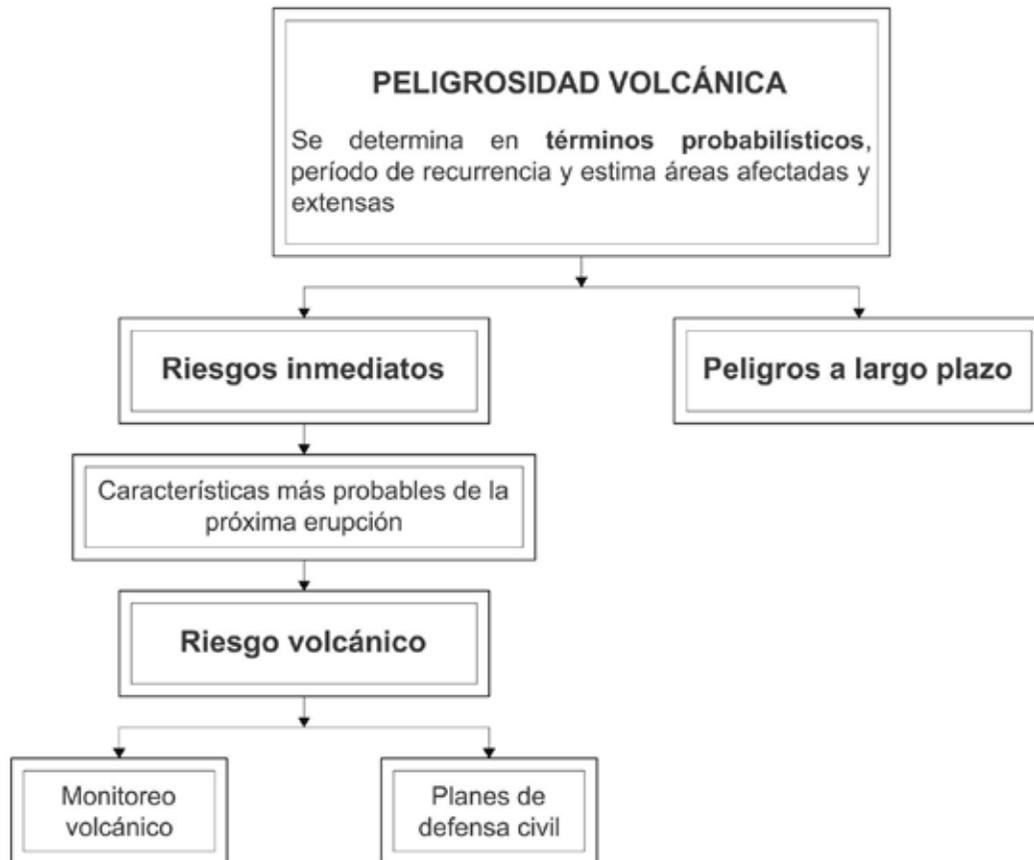
Flujo de lodo o lahar: es la masa de agua que adquiere velocidad y a medida que pasa por los arenales, adquiere densidad. Lleva consigo piroclastos de la erupción actual y de las anteriores.

Volcanes

Activos: ha presentado actividad en épocas históricas y por lo tanto existe un registro en el Ecuador, el tiempo se debe tratar de llevarlo a tiempo geológico, es decir, volcanes holocénicos, que presenten características de actividad, presentan síntomas de que su actividad continúa.

En reposo temporal: son aquellos en los que no se conocen registros de su actividad pero que presenta síntomas de actividad.

Extintos: no presentan ningún síntoma de actividad del calor interno (Ruco Pichincha)



Riesgos volcánicos

Flujo de lodo: es benigno con respecto a la vida humana, pero es destructivo para las propiedades.

Flujos piroclásticos: sumamente destructivos.

Caída de ceniza: causa daños al arruinar terrenos cultivables.

Flujos de lodo o lahares: tienen un efecto devastador, son muy veloces.

Emanación de gases: son tóxicos, pero solo afecta a la periferia del volcán.

Movimientos sísmicos: sus efectos son destructivos en la periferia inmediata del cono, llegando a magnitudes de 4 a 5.

La energía liberada en una erupción ha llegado a valores de 10^{26} Ergios (volcán Timbara en 1815).

Normalmente se tiene 10^{22} a 10^{25} Ergios, la energía se libera en forma calorífica y cinética, la energía de una bomba nuclear es 10^{21} ergios, es decir, que cada día se libera mucha más energía que una bomba de hidrógeno.

La velocidad de un flujo de lava es 55 km/h. lavas muy fluidas

La longitud mayor alcanzada por un flujo de lava es 200 km (Columbia, EEUU)

El máximo volumen registrado en 7.3 km^3 (Laki, Islandia).

Núcleos de roca

Perforación rotatoria

Las fuerzas aplicadas en la perforación de un núcleo de roca constituyen:

- Empuje
- Rotación
- Aire
- Agua

Se aplica la fuerza de empuje de manera constante en la broca que permanece en contacto directo con la roca. El número de revoluciones al que gira el escariador depende del tipo del suelo en el que se está trabajando.

El aire y el agua circulan por dentro de la barra de perforación para salir por las paredes del pozo con el objetivo de enfriar el fragmento de roca. (Figura 98)

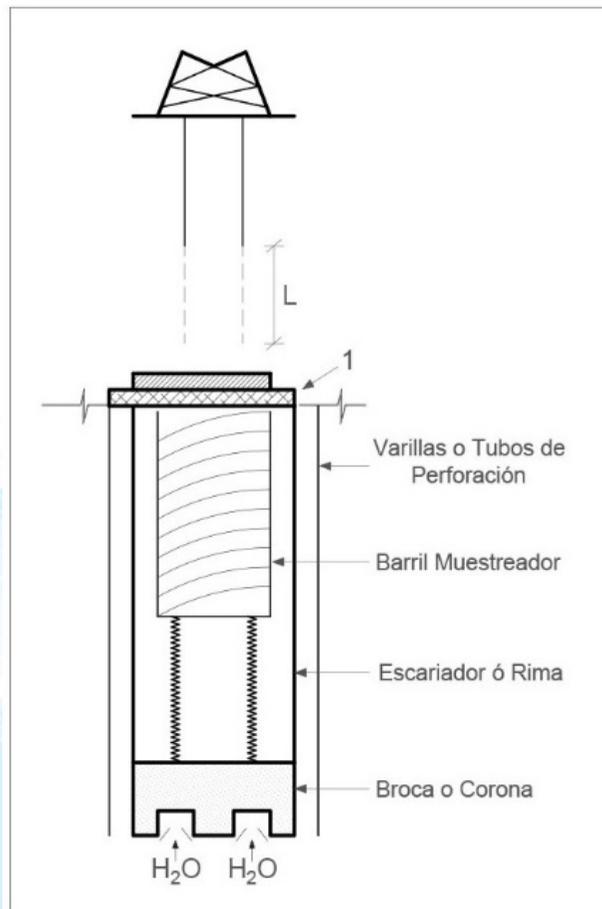
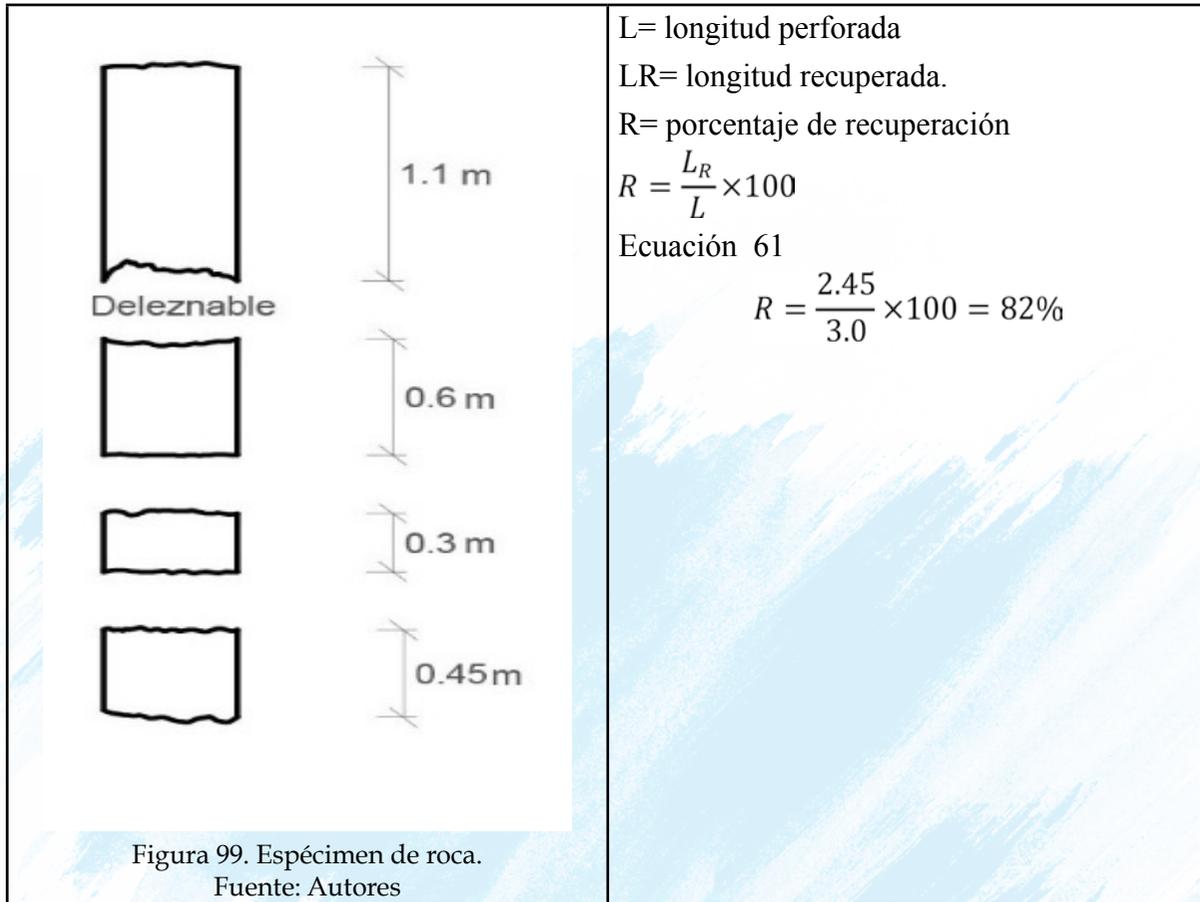


Figura 98. Barreno de perforación para extracción de núcleo de roca.
Fuente: Autores

La columna de perforación está compuesta por:

- Broca o corona: es una herramienta que hace la operación y tiene en la punta diamante. Sobre la broca se tiene el escariador o rima (rimaning shell) con una escotadura o lima. Tiene como función mantener el diámetro de la perforación.
- Batería o barril muestreador o porta testigos
- Varillas o tubos de perforación: transmite el movimiento circular que transmite la máquina y la presión que genera la máquina (presión hacia abajo) y conduce el agua de perforación.
- Salida de agua, que permite tener un jet. Esta a su vez cumple 2 funciones: refrigerar la corona y levanta a la superficie el material resultante de la perforación.
- Los barriles muestreadores varían de 1.5 a 3m de largo, muchas veces por las dificultades se recuperan testigos pequeños. (Figura 99)

Calidad de la roca: es el denominado porcentaje de recuperación.
 Un primer parámetro para definir la roca R% de recuperación

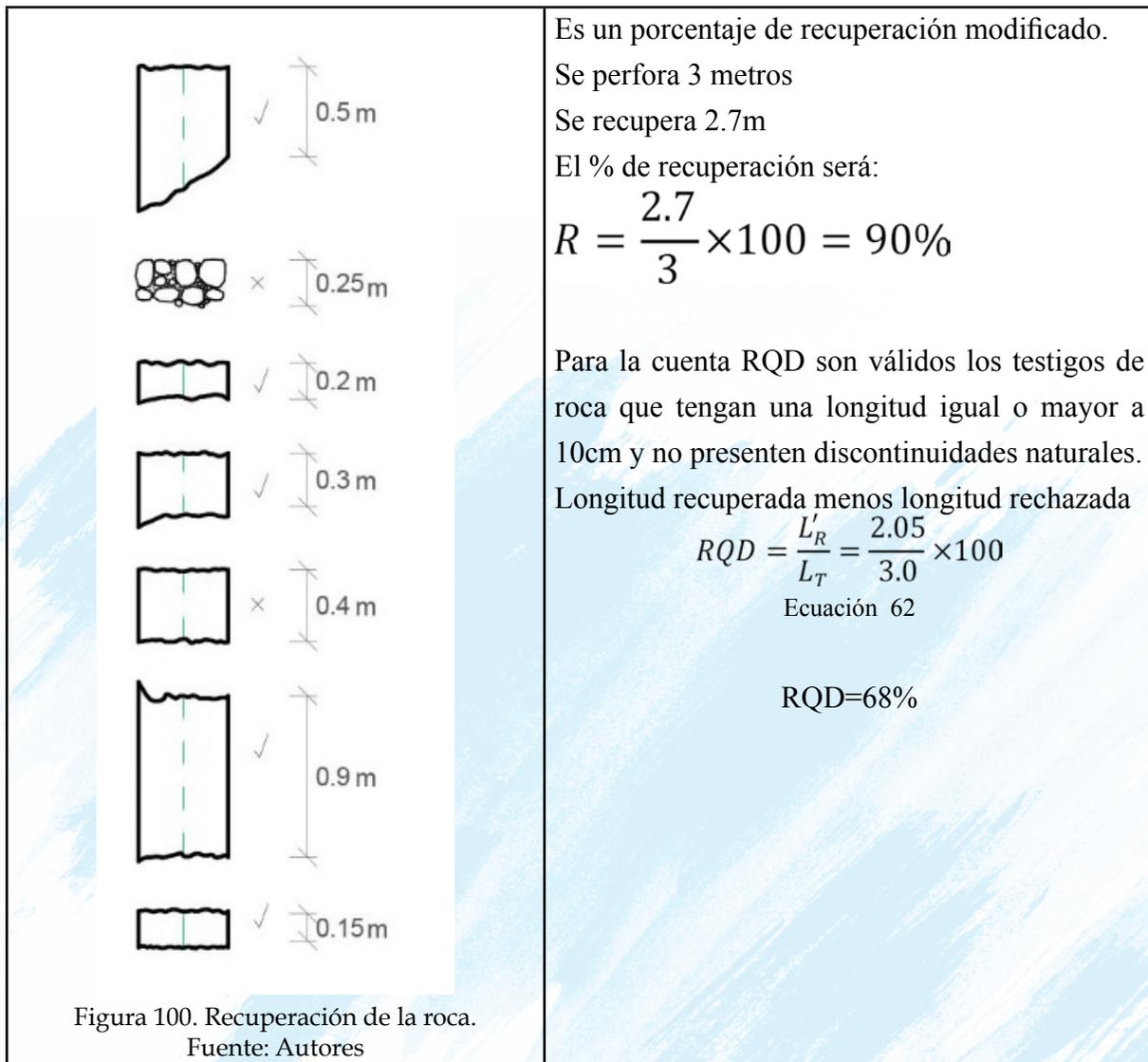


El 18% de la longitud del testigo se perdió en las maniobras de perforación.
 El % de recuperación nos da la calidad de la roca.

Pueden presentarse roturas por exceso de revoluciones y demasiada presión recuperando menor cantidad de roca por fallas humanas. (Figura 100)+

El porcentaje de recuperación como índice de calidad de la roca es subjetivo.

RQD ROCK QUALITY DESIGNATION - ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA



A mayor discontinuidades, menor calidad de la roca

Tabla 27. Valorización de calidad de roca según parámetro RQD

RQD		Calidad
<25		Muy mala
25	50	Mala
50	75	Regular
75	90	Buena
90	100	Excelente

Fuente:(Bieniawski, 1979)

Método sísmico indirecto para el cálculo de RQD

Es un parámetro que determina la calidad de la roca. Se pone una carga en el agujero A y geófonos en B. Se registra Vf. (Figura 101)

Vf= velocidad de transmisión de la onda sísmica en formación

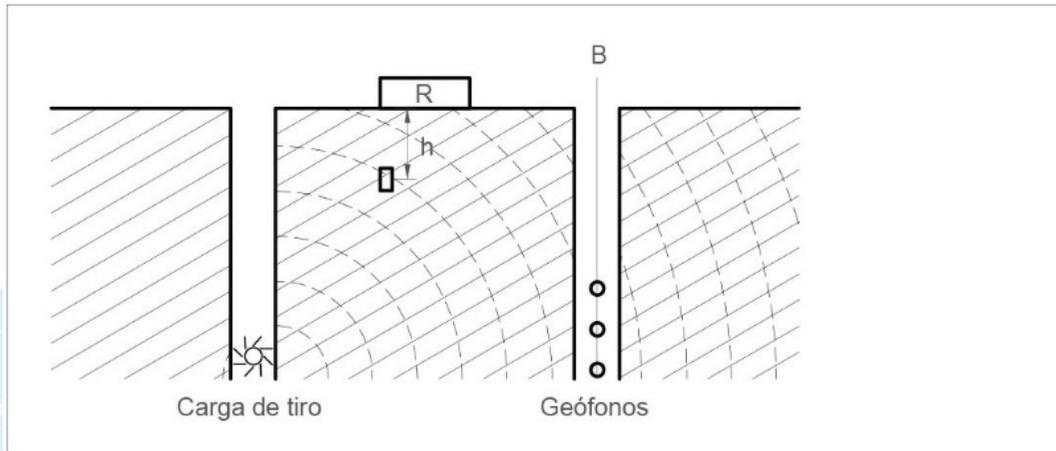


Figura 101. Velocidad relativa.

Fuente: Autores

Se procede a sacar un testigo y se envía al laboratorio en donde se lo somete a una carga P= presión, Pl= presión litostática del sitio del que fue extraído. (Figura 102)

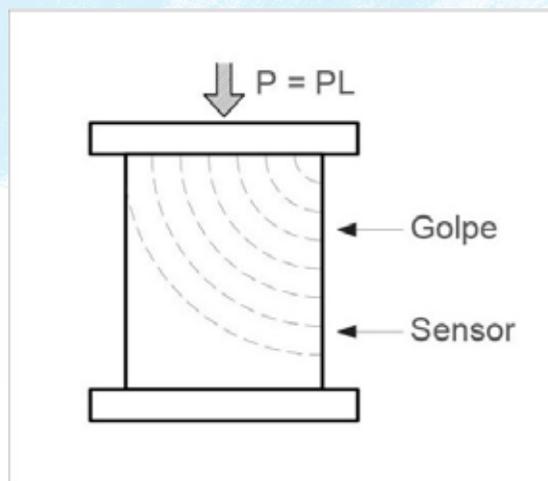


Figura 102. Testigo.

Fuente: Autores

$$P_L = H \times P_e = h \times G$$

Ecuación 63. Presión litostática

A este espécimen se le mide la velocidad de ondas sónicas y se obtiene la velocidad en el laboratorio V_L .

Obtenidos V_L y V_F se puede determinar la velocidad relativa.

$$V_R = \frac{V_F}{V_L}$$

Ecuación 64. Velocidad relativa

En el caso de que V_L y V_F sean homogéneos e isotrópicos, $V_R=1$. Pero debido a que en la naturaleza no ocurre esto, existe presencia de discontinuidades $V_L \neq V_F$

A medida que aumentan las discontinuidades, V_R se hace una fracción, $V_F < V_L$

$$V_R = \frac{V_F}{V_L} \text{ Por métodos empíricos.}$$

Se ha llegado a determinar:

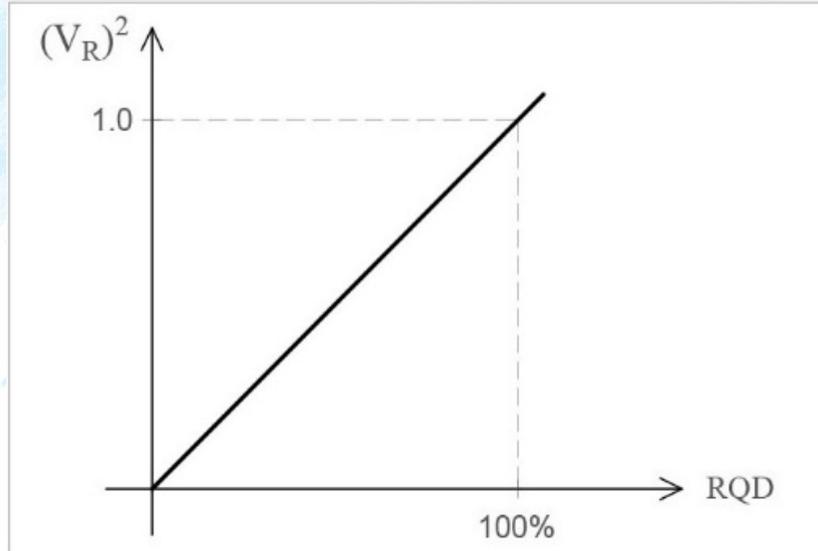


Figura 103. Diagrama V relativa -RQD.
Fuente: Autores

La velocidad de la onda sísmica está influenciada por el número de fracturas; mientras mayores discontinuidades existan, mayores serán los obstáculos para que la velocidad se propague. El número de discontinuidades aumenta la velocidad.

Velocidad de ondas sísmicas: aumenta si es que disminuyen las discontinuidades. Disminuye si aumentan las discontinuidades.

La fracturación determina la calidad de la roca (desde el punto de vista del comportamiento mecánico, que está influenciado por el número de fracturas). Lo que incide en el índice de calidad de la roca RQD. (Figura 103)

Velocidad (VL): velocidad de ondas sísmicas longitudinales.

Fracturamiento: número de juntas sobre metro.

RQD: se expresa en porcentaje.

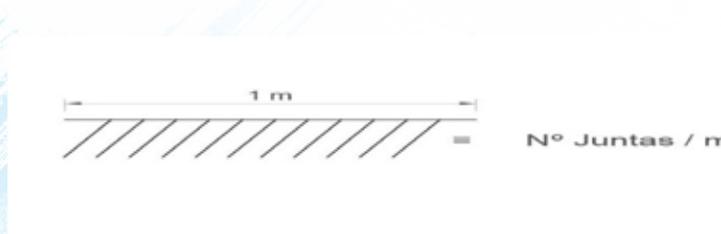


Figura 104. Número de juntas.
Fuente: Autores

Velocidad (V_p) m/s	3000	3500	4000	4500	5000	5500
Fracturamiento N ^o Juntas/m	19	13.5	9.5	6.5	4	3.5
RQD (%)	25	45	63	78	88	94

Se han trabajado anfibolitas, granito, gneis, pegmatitas, porfídica, cuarcita, y milonita.

Del cuadro anterior se puede deducir que la velocidad está en relación directa con el número de fracturas y que a su vez da la calidad de la roca. (Figura 104)

La dispersión de fracturas fue ± 0.8 fractura/metro. RQD= 3.5%

Planificación

Objetivo: sustentar la exploración directa, tratar de objetivar (sustentar la exploración geofísica)

Equipo: la selección adecuada del equipo dará una mejor garantía, y el taladro deberá cumplir con facilidad, versatilidad, maniobrabilidad.

Un equipo de adecuado peso minimiza las perforaciones.

Taladro: el diámetro depende de las profundidades de perforación y en ingeniería civil es el NW y es una denominación derivada de la asociación norteamericana de perforaciones. NW es el número mínimo.

Tabla 28. Diámetros de taladros de perforación

Denominación	Testigo (mm)	Taladro en (mm)
EW	37.9	47.6
AW	48.2	59.5
BW	60.1	75.3
NW	75.9	91.8
HW	99.6	117.4

Fuente: Reaming Shell

Herramientas de diamante

La matriz se puede seleccionar y está caracterizada y esa característica será la dureza, cada matriz tiene su color.

Color	Denominación	Dureza de Rockwell	
Bronce	R regular	20	30
Plata	H dura	30	40
Gris oscuro	XH extra dura	40	80

	Calidad de diamantes
1er grado	Alto precio- quilate (uso general)
2do grado	Precio intermedio –quilate (uso general)
3er grado	Bajo precio -quilate

El número de diamantes por quilate, se tienen diamantes de gran tamaño.

Diamantes	# piedras	
Gran tamaño	6	15
Tamaño mediano	15	40
De mediano a pequeño	25	40
Tamaño pequeño	40	60



Figura 105. Tricono.
Fuente: Autores



Figura 106. Brocas de perforación.
Fuente: Autores

Equipo	Tamaño	
	Herramienta de diamante	Matriz dura
		Calidad de diamante
		Número de piedras/ quilate, tamaño
		Cantidad, peso de diamantes
	Barril muestreo	pared simple
		Doble pared
Triple pared (formaciones friables)		

GALERIAS DE EXPLORACIÓN

Perforaciones: se quiere obtener muestras de suelos alterados e inalterados. Recuperación de testigos de roca, pruebas de permeabilidad, inspecciones de las paredes del agujero de perforación, utilizando técnicas de televisión y fotografía.

Excavación (calicatas y galerías exploratorias): se obtienen muestras de suelos de rocas blandas. Se puede mirar la estratigrafía. Se puede hacer una caracterización del macizo. Se tiene la oportunidad de observar fallas y juntas (calicatas: son trincheras y pozos a nivel superficial.)

Galerías exploratorias: permiten la entrada al geólogo en el macizo. Se debe diseñar la perforación de las galerías y sirven para realizar ensayos in situ. Estas galerías deben permitir un trabajo razonable de observación. (Figura 107 y 108)

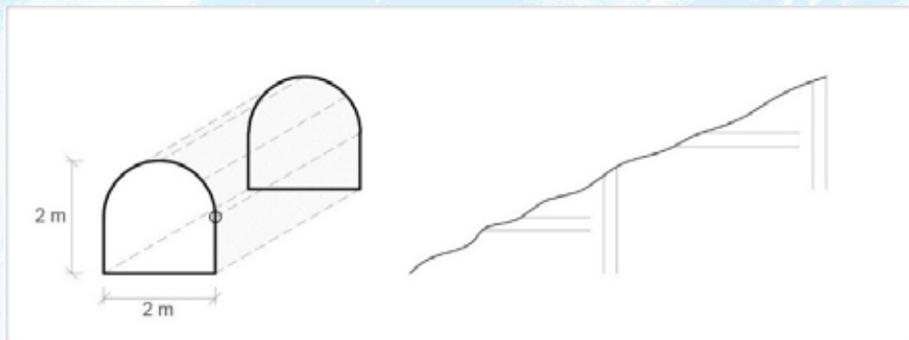


Figura 107. Galerías exploratorias.
Fuente: Autores

Se propaga la longitud de la galería de acuerdo a la posibilidad de tener los dispositivos de alrededor.

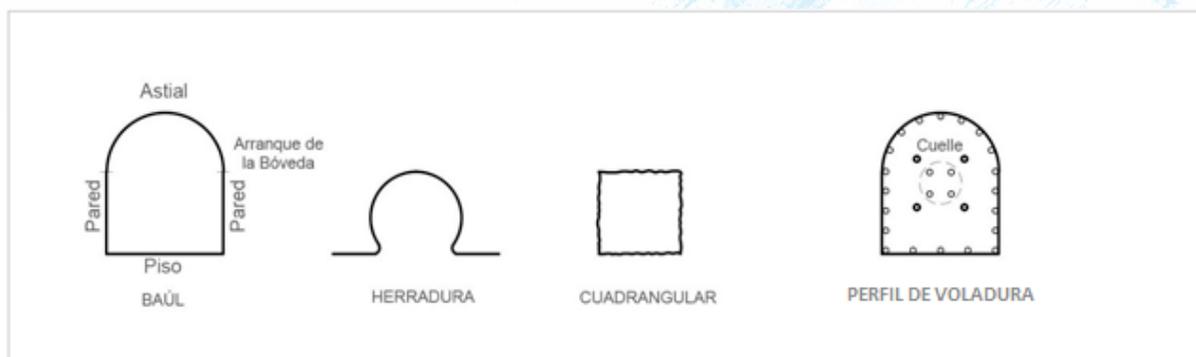


Figura 108. Tipos de galerías.
Fuente: Autores

Diseño de diagrama de tiro: diseño de perforaciones y tiempo de las detonaciones.

El diagrama considera el tamaño de piedras que se quieren obtener, y se obtiene un determinado peso de explosivos por

Cuelle: son los primeros en detonar, son los de menos retardo o sin él. Las explosiones vienen de adentro hacia afuera, no es obligación que todos los barrenos se carguen.

- Factor de carga
- Distancia entre barrenos.
- Profundidad de perforación
- Secuencia de disparos o retardos

Nos interesa evitar sobre excavaciones y que el macizo sufra el menor daño. El método clásico consiste en:

- Barrenar
- Cargar
- Detonar
- Ventilar
- Desquinchar (quitar piedras colgadas) México: rezagar. Chile: marinar
- Extraer el material
- Levantamiento geológico.

Se debe considerar contactos geológicos, litológicos, estratigráficos y la determinación del nivel freático.

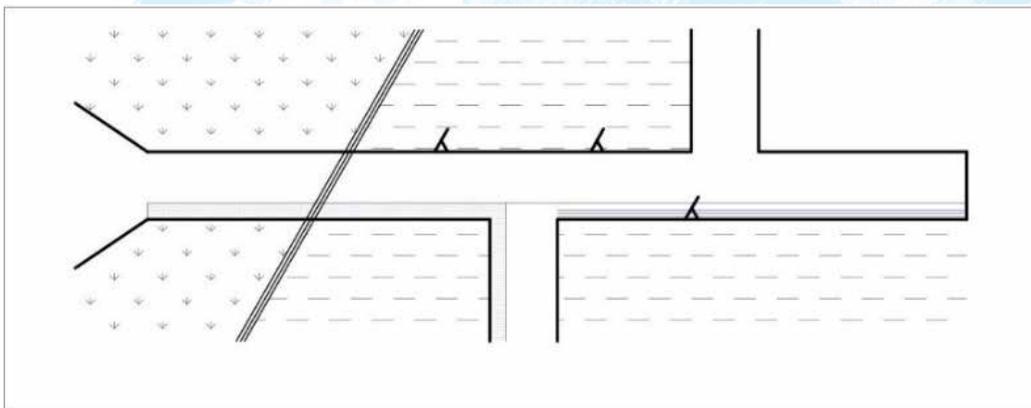


Figura 109. Mapa geológico.
Fuente: Autores

Un mapa geológico realizado en dos dimensiones es impracticable. (Figura 109)

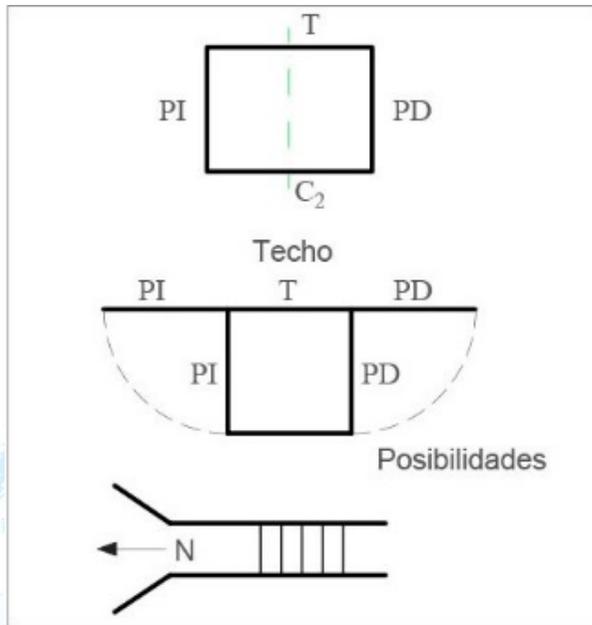


Figura 110.
Fuente: Autores

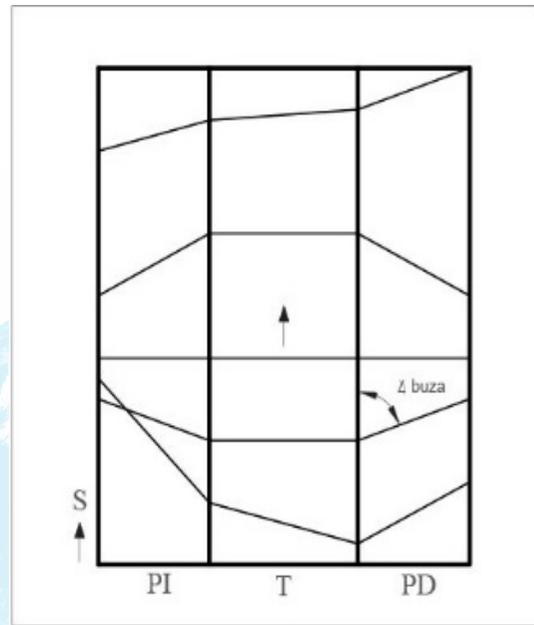


Figura 111.
Fuente: Autores

La prueba de carga directa consiste en aplicar cargas directas y medir las deformaciones que se generan.

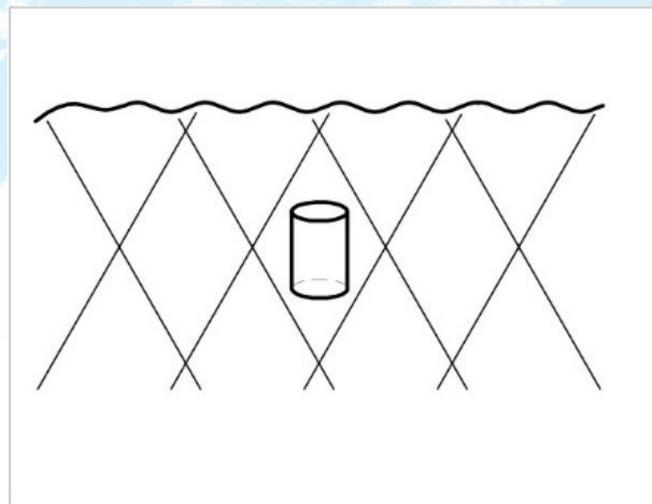


Figura 114.
Fuente: Autores

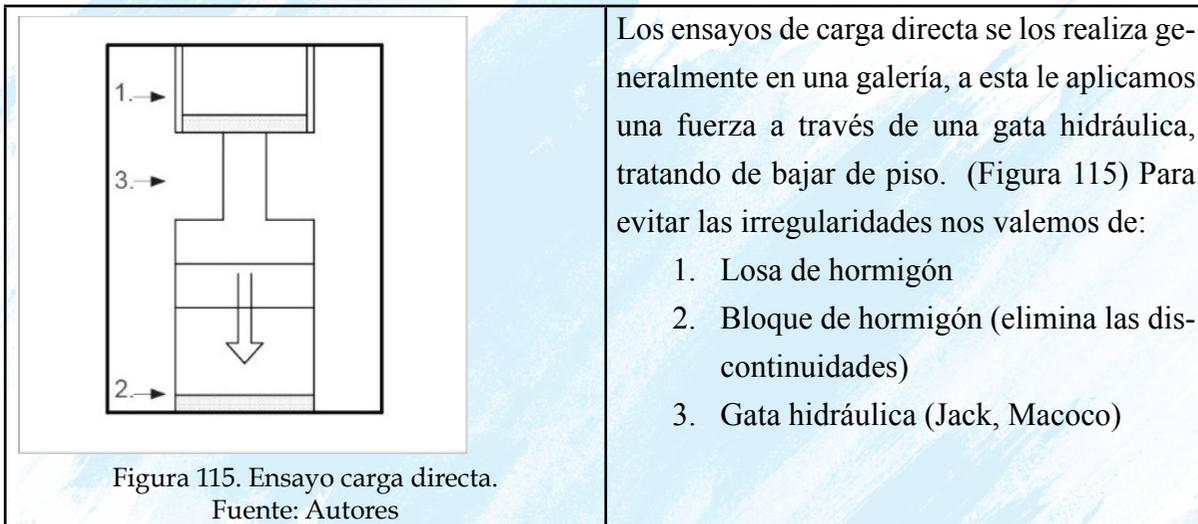
E_D Módulo de deformación

E_S El módulo elástico máximo en un espécimen. (El espécimen no es tomado en deformación sino en sustancia rocosa)

Módulo de deformación \leq módulo elástico

$$E_D \leq E_S$$

Una roca con muchas discontinuidades, el valor de E_D es una fracción de E_S . En rocas con pocas discontinuidades el valor de E_D tiende a parecerse a E_S .



En ingeniería civil para repartir cargas se usa de cimiento el plinto o zapata.

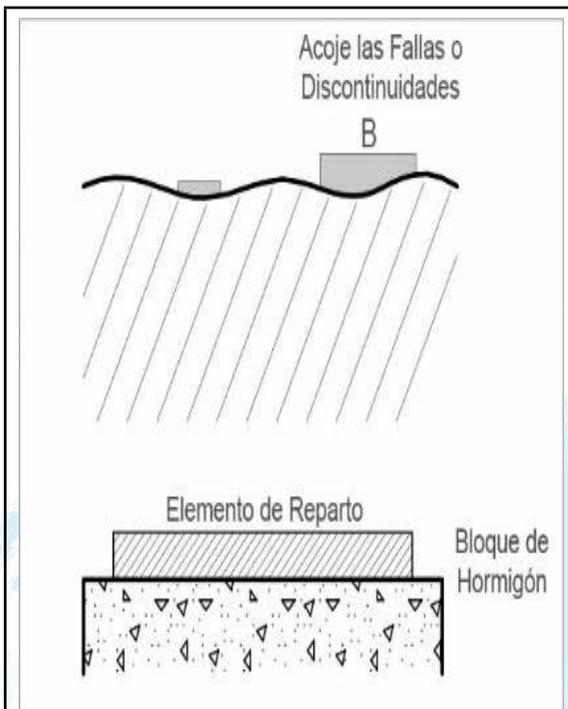


Figura 116.
Fuente: Autores

- a. Para provocar deformaciones medibles, la carga debe ser de varios cientos de toneladas.
- b. La carga debe ser suficiente para aplicar deformaciones medibles en superficies representativas.

Las superficies representativas son dudosas por su distribución en discontinuidades.

En forma ideal esto supondría que la superficie del área cargada sea mayor que el intervalo de discontinuidades. Las superficies representativas deben involucrar una superficie que entren un mayor número de juntas. (Figura 116)

El área de la superficie cargada debe ser grande para obtener una superficie medible.

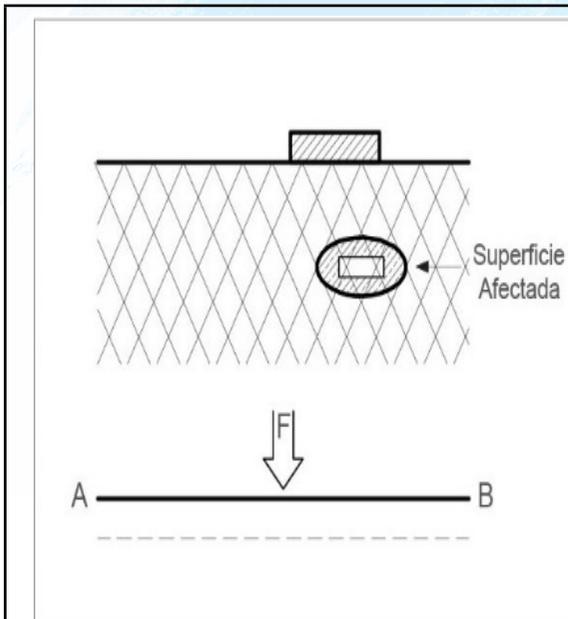


Figura 117
Fuente: Autores

En promedio la separación entre juntas es de más de 1 metro, debemos involucrar por lo menos dos discontinuidades, esto implica 2 complicaciones.

1. Magnitud de la carga
2. Distribución de la galería (genera gastos)

Como en general se ha tomado en la prueba de carga directa, como una superficie de 1.5 metros, el caso B. con este elemento de reparto la profundidad de la roca no es muy grande y varía de 1 a 2 metros que dependerá de las características mecánicas de la roca. (Figura 117)

La magnitud de la carga será dependiendo a la magnitud de la superficie tomada y de la galería (posibilidad de poner una gata)

- Son típicas 300 toneladas sobre una superficie de 1m²
- Son típicas 700 toneladas sobre una superficie de 1.2m²

Dimensionando el tamaño y la magnitud de la carga nos valemos de la solución de Boussinesq; que es parte de la teoría de elástica y propone una teoría para cuantificar el desplazamiento de una superficie semi infinita bajo la acción de una carga normal puntual. (Figura 118)

$$\bar{W}_o = \frac{\bar{m}P(1 - \mu^2)}{E_D \sqrt{A}}$$

Ecuación 65. Ecuación de Boussinesq

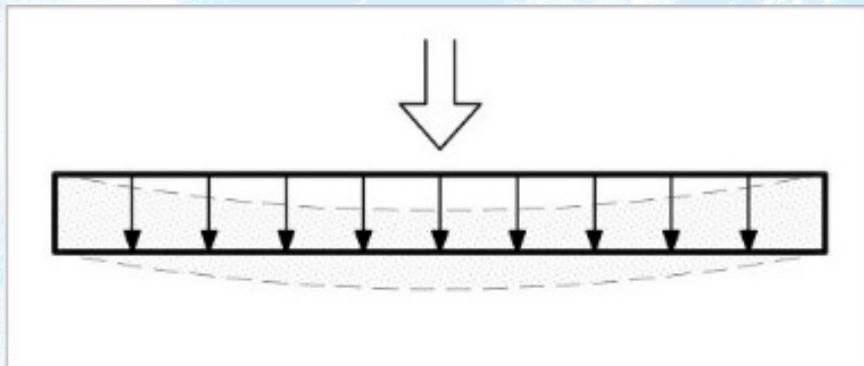


Figura 118. Deformación Zapata.
Fuente: Autores

W_o Asentamiento medio de la superficie cargada (L).

\bar{m} Coeficiente de desplazamiento, está en función de la superficie cargada y su distribución

P Carga normal total (es una fuerza F)

μ Relación o coeficiente de Poisson (relación de las deformaciones de diámetro con las longitudes)

E_D Módulo de deformación elástica de una roca confinada (F/L²)

A área (L²)

μ

0.2 Basalto y otras rocas

0.3 granito

0.4 Roca masiva con discontinuidades separadas

0.5 Material más elástico (naturaleza) caucho

Círculo	Rectángulo con relación de lados a/l						
	1:1	1:1.5	1:2	1:3	1:5	1:10	1:100
0.96	0.95	0.94	0.92	0.88	0.82	0.71	0.37

Cuando los valores a/b decrece, el valor también decrece.

Características del elemento de reparto

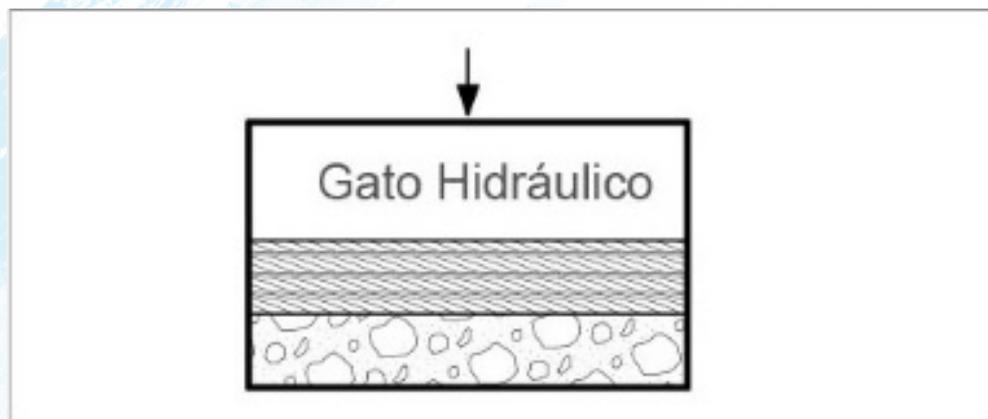


Figura 119. Gata hidráulica.
Fuente: Autores

Se sabe disponer de un tanque metálico lleno de aceite, sobre este se orienta el gato. (Figura 119)

Métodos de medida: se refiere a las medidas de las deformaciones. El objetivo es tener deformaciones medibles y son 0.01 a 0.1 cm (magnitud de deformaciones)

Dimensiones de la galería: hay que justificar la hipótesis de la superficie de un sólido semi infinito.

- Las paredes de la galería deben ser de una extensión, deben ser planas en un reparto 3.4 veces el elemento de reparto.
- Cuidar las distancias, tomando en cuenta el espacio que el gato va a utilizar
- Influencia mucho la distancia y la superficie topográfica libre sea mayor o igual a 10 hectáreas.
- Debe ser perpendicular a la estratigrafía.

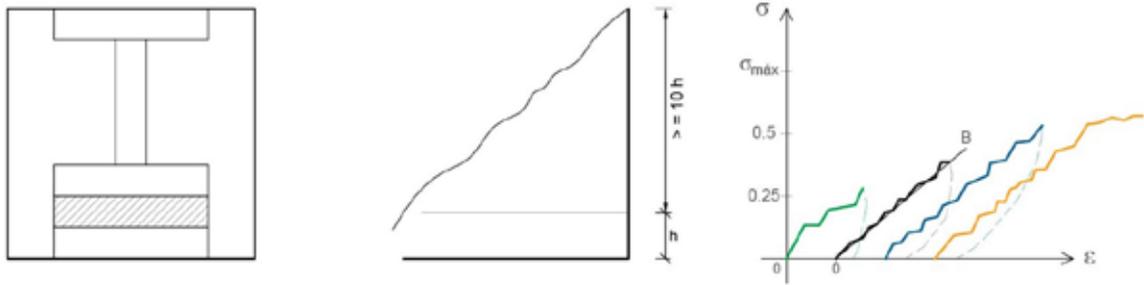


Figura 120. Dimensionamiento de las galerías
Fuente: Autores

1. Cargar, existe una influencia inelástica
2. Cargar nuevamente, obteniendo los mismos valores.
3. Cargar y llevar al 100% la carga máxima.

La pendiente de la recta OB es el módulo de deformación que será la tangente de alfa

$$E_D = tg(\alpha) = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Ecuación 66. Módulo de deformación

Cuando se incrementa la carga, la roca adquiere mayor rigidez, se vuelve más monolítica A MO se la calcula como el módulo secante para el segundo ciclo.

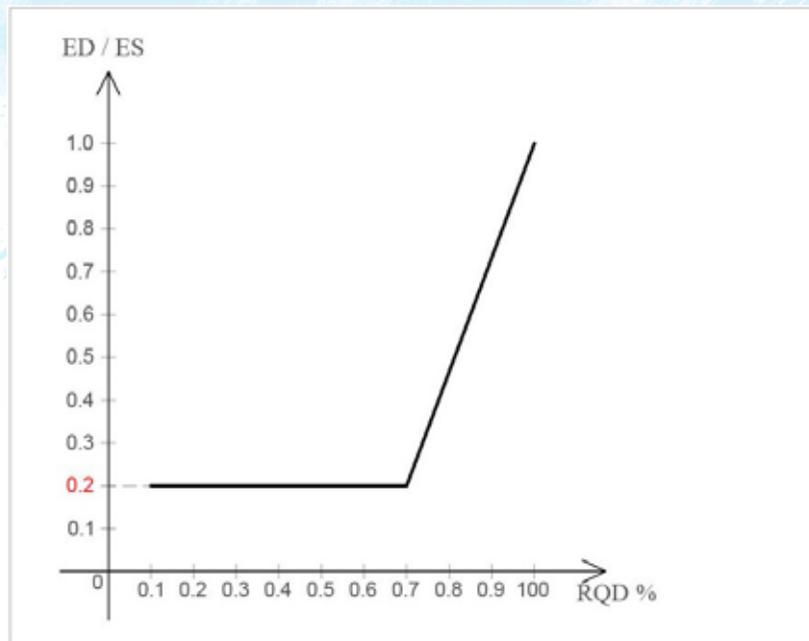


Figura 121. Diagrama ED- RQD.
Fuente: Autores

El RQD es una herramienta que permite calificar la cualidad de la roca, con el RQD (testigo de roca) y E_s (lavado) se puede predecir el valor de ED. (Figura 121)

El suelo también se deforma, pero tiene características físico-mecánicas diferentes que las rocas. (Figura 122)

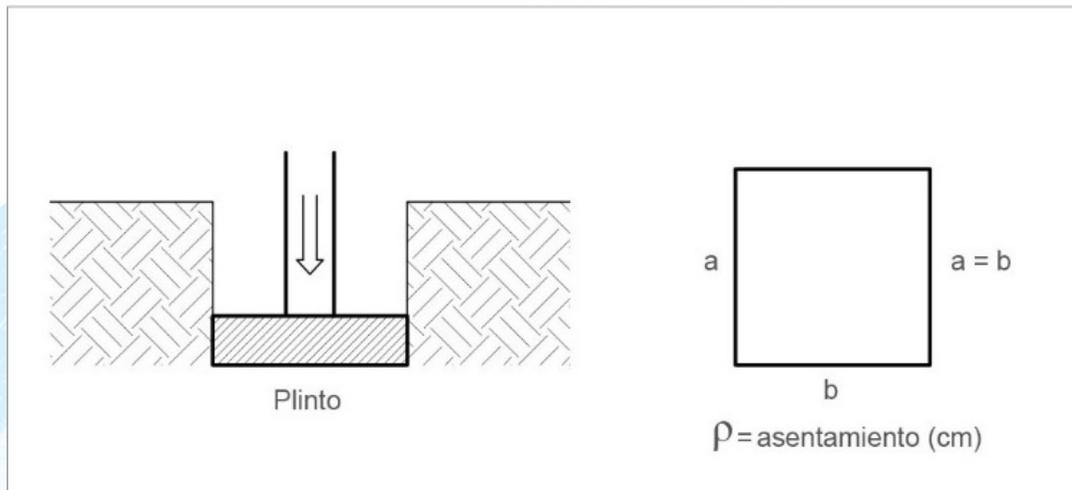


Figura 122. Asentamiento.
Fuente: Autores

ρ = asentamiento por contacto, se produce cuando la forma de la masa del suelo bajo una zapata se deforma. (Figura 123)

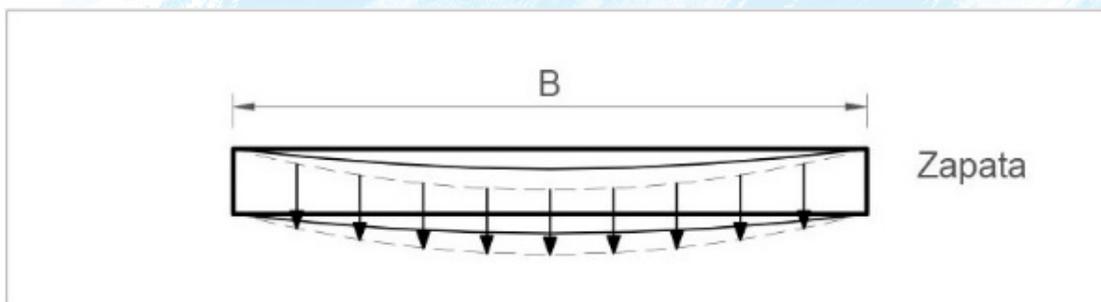


Figura 123. Deformación zapata por fuerzas.
Fuente: Autores

q = se produce esa deformación por presión uniforme.
 B = ancho del crecimiento de la zapata o plinto.
 E = módulo elástico uniforme homogéneo.

$$\rho = \frac{0.6 \times q \times B}{E}$$

Ecuación 67. Asentamiento

$$\rho = \frac{0.6 \times Q}{E \sqrt{A}}, \text{ asentamiento por contacto}$$

Al ser una zapata cuadrangular, $B = \sqrt{A}$

PROBLEMAS LIGADOS CON LAS ROCAS

Rocas ígneas intrusivas: se los considera uno de los materiales más homogéneos, es el que se presenta con el coeficiente de concentración de los esfuerzos

$\sigma_h > \sigma_v$ Son rocas sobre presionadas (popping rock), muy difíciles de trabajar y se debe tener cuidado en las rocas graníticas

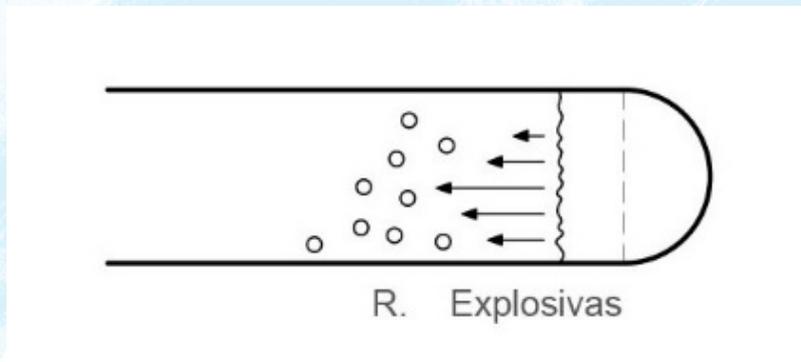


Figura 124. Rocas sobre presionadas
Fuente: Autores

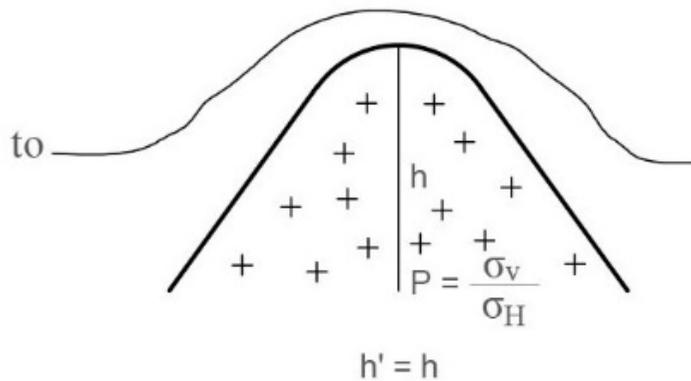


Figura 125. Liberación de esfuerzos por presión
Fuente: Autores

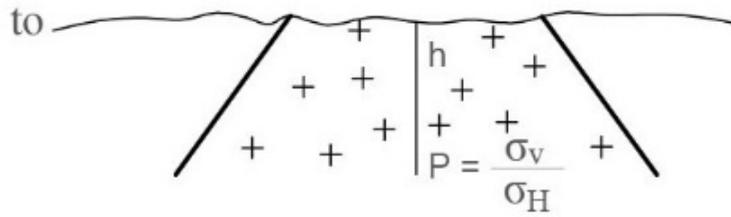


Figura 126. Ajuste de los esfuerzos
Fuente: Autores

$$\sigma_v = 135 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\mu = 0.30$$

$$\sigma_h = 0.43 \sigma_v$$

$$\sigma_h = 58 \frac{kg}{cm^2}$$

$$t_1 = 1600 \text{ min}$$

$$P = 1600$$

$$\sigma_v = G \times h = 1600 \times 2.25 = 3600 \frac{T}{m^2}$$

$$\sigma_v = 360 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma_h = 154.8 \frac{kg}{cm^2}$$

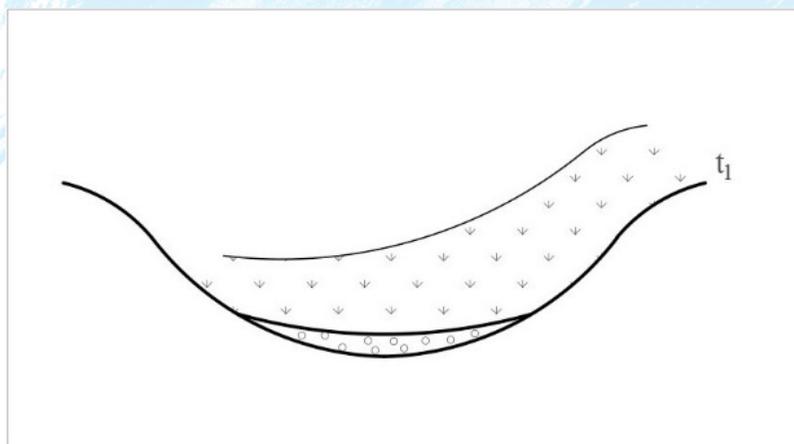


Figura 127. Aluviales en t1
Fuente: Autores

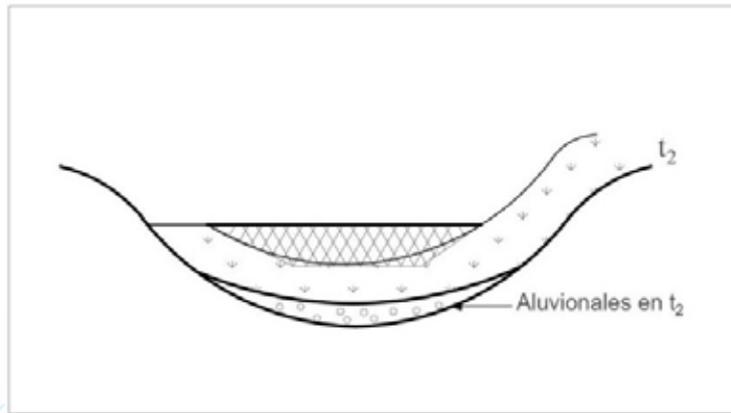


Figura 128. Aluviales en t_2
Fuente: Autores

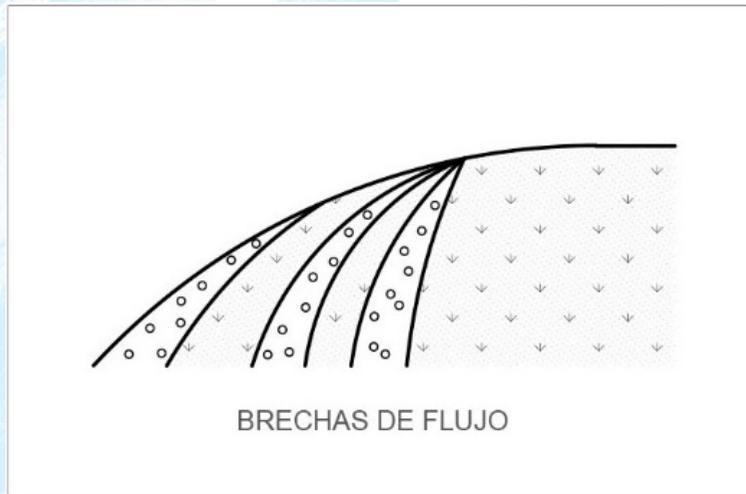


Figura 129. Brechas de flujo.
Fuente: Autores

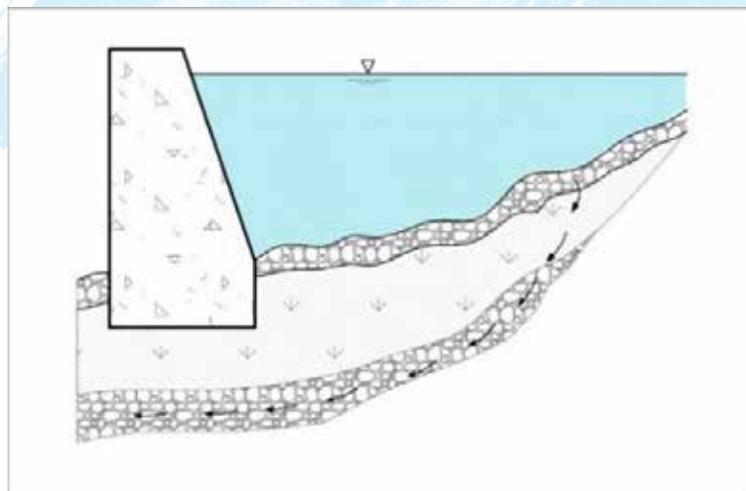


Figura 130.
Fuente: Autores

En el caso de que una presa no se llene, pudiera ser el hecho de que no se cimentó sobre la roca adecuada (aluviales bajo la sedimentación)

Rocas metamórficas: son problemas de discontinuidades que presentan acumulaciones de gases (carbonatos tóxicos como metano).

La foliación es una característica al corte y en una alta deformabilidad como conclusión de una roca mala. La presencia de zonas cizalladas, interfoliadas, causan problemas de estabilidad.

Rocas sedimentarias: presencia de zonas cizalladas e interestratificadas con cavidades kársticas. Son rocas saludables de arcillas expansivas y arcillas dispersivas que en contacto con el agua se disuelven.

Guía de procesos para distintos problemas geotécnicos.

Problemas Geotécnicos	Evaluaciones de Ingeniería	Información Requerida para el Análisis	Pruebas de Campo	Prueba de Laboratorio
Respuesta de sitio	<input type="checkbox"/> caracterización de fuentes y atenuación de movimiento de tierra <input type="checkbox"/> espectros de respuesta del sitio <input type="checkbox"/> historial de tiempo	<input type="checkbox"/> perfil subterráneo (suelo, aguas subterráneas, profundidad de roca) <input type="checkbox"/> velocidad de onda de corte <input type="checkbox"/> módulo de corte para bajas deformaciones <input type="checkbox"/> relación del módulo de corte con el aumento de la deformación de corte, OCR, y PI relación de amortiguamiento viscoso equivalente con el aumento de la deformación de corte, OCR, y PI <input type="checkbox"/> relación de Poisson <input type="checkbox"/> peso unitario <input type="checkbox"/> densidad relativa <input type="checkbox"/> sismicidad (diseño de sismo –fuente, distancia, magnitud, recurrencia)	<input type="checkbox"/> SPT <input type="checkbox"/> CPT <input type="checkbox"/> cono sísmico <input type="checkbox"/> pruebas geofísicas (Velocidad de onda de corte) <input type="checkbox"/> piezómetro	<input type="checkbox"/> límites de Atterberg <input type="checkbox"/> distribución del tamaño de grano <input type="checkbox"/> gravedad específica <input type="checkbox"/> contenido de humedad <input type="checkbox"/> peso unitario <input type="checkbox"/> columna resonante <input type="checkbox"/> ensayo de corte simple cíclico directo <input type="checkbox"/> ensayo de corte simple torsional <input type="checkbox"/> ensayos triaxiales cíclicos
Evaluación de peligros geológicos (por ejemplo, licuefacción, extensión lateral, estabilidad de taludes, fallamiento)	<input type="checkbox"/> susceptibilidad de licuefacción <input type="checkbox"/> licuefacción de asentamiento inducida <input type="checkbox"/> asentamiento de arenas secas <input type="checkbox"/> falla de flujo de extensión lateral <input type="checkbox"/> estabilidad y deformación de taludes	<input type="checkbox"/> perfil subterráneo (suelo, aguas subterráneas, roca) <input type="checkbox"/> fuerza de corte (cima y residual) <input type="checkbox"/> Pesos unitarios <input type="checkbox"/> distribución del tamaño de grano <input type="checkbox"/> características de plasticidad <input type="checkbox"/> densidad relativa <input type="checkbox"/> resistencia a la penetración <input type="checkbox"/> velocidad de onda de corte <input type="checkbox"/> sismicidad (PGA, diseño de sismo, datos de desagregación, tiempos marcados por el movimiento del suelo) <input type="checkbox"/> topografía del lugar	<input type="checkbox"/> SPT <input type="checkbox"/> CPT <input type="checkbox"/> cono sísmico <input type="checkbox"/> ensayo de penetración Becker (BPT) <input type="checkbox"/> ensayo de corte de veleta <input type="checkbox"/> piezómetros <input type="checkbox"/> pruebas geofísicas (Velocidad de onda de corte)	<input type="checkbox"/> distribución del tamaño de grano <input type="checkbox"/> límites de Atterberg <input type="checkbox"/> gravedad específica <input type="checkbox"/> contenido orgánico <input type="checkbox"/> contenido de humedad <input type="checkbox"/> peso unitario <input type="checkbox"/> análisis de resistencia al corte del suelo (estático y cíclico) <input type="checkbox"/> deformación volumétrica post-cíclico
Problemas Geotécnicos	Evaluaciones de Ingeniería	Información Requerida para el Análisis	Pruebas de Campo	Prueba de Laboratorio

<p>Entrada para el diseño estructural</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> rigidez del suelo para cimentaciones superficiales (por ejemplo, elasticidad) <input type="checkbox"/> datos P-Y para cimentaciones profundas <input type="checkbox"/> fricción negativa en cimentaciones profundas <input type="checkbox"/> resistencia residual <input type="checkbox"/> presión lateral del suelo <input type="checkbox"/> extensión lateral / movimiento de carga en taludes <input type="checkbox"/> asentamiento post sismo <input type="checkbox"/> interacción cinemática suelo-estructura 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> perfil subterráneo (suelo, aguas subterráneas, roca) <input type="checkbox"/> fuerza de corte (cima y residual) <input type="checkbox"/> coeficiente de balasto horizontal <input type="checkbox"/> coeficientes de empuje horizontal sísmico <input type="checkbox"/> módulo de corte para bajas deformaciones o velocidad de onda de corte <input type="checkbox"/> relación del módulo de corte con el aumento de la deformación de corte <input type="checkbox"/> peso unitario <input type="checkbox"/> relación de Poisson <input type="checkbox"/> sismicidad (PGA, diseño de sismo, espectro de respuesta, tiempos marcados por el movimiento del suelo) <input type="checkbox"/> topografía del lugar <input type="checkbox"/> Interfaz de fuerza 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> CPT <input type="checkbox"/> SPT <input type="checkbox"/> cono sísmico <input type="checkbox"/> piezómetros <input type="checkbox"/> pruebas geofísicas (Velocidad de onda de corte, resistividad, gamma natural) <input type="checkbox"/> ensayo de corte de veleta <input type="checkbox"/> presiómetro 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> distribución del tamaño de grano <input type="checkbox"/> límites de Atterberg <input type="checkbox"/> gravedad específica <input type="checkbox"/> contenido de humedad <input type="checkbox"/> peso unitario <input type="checkbox"/> columna resonante <input type="checkbox"/> ensayo de corte simple cíclico directo <input type="checkbox"/> ensayo triaxial (estático y cíclico) <input type="checkbox"/> ensayo de corte torsional <input type="checkbox"/> ensayo de corte directo en la interfaz
---	--	---	--	--

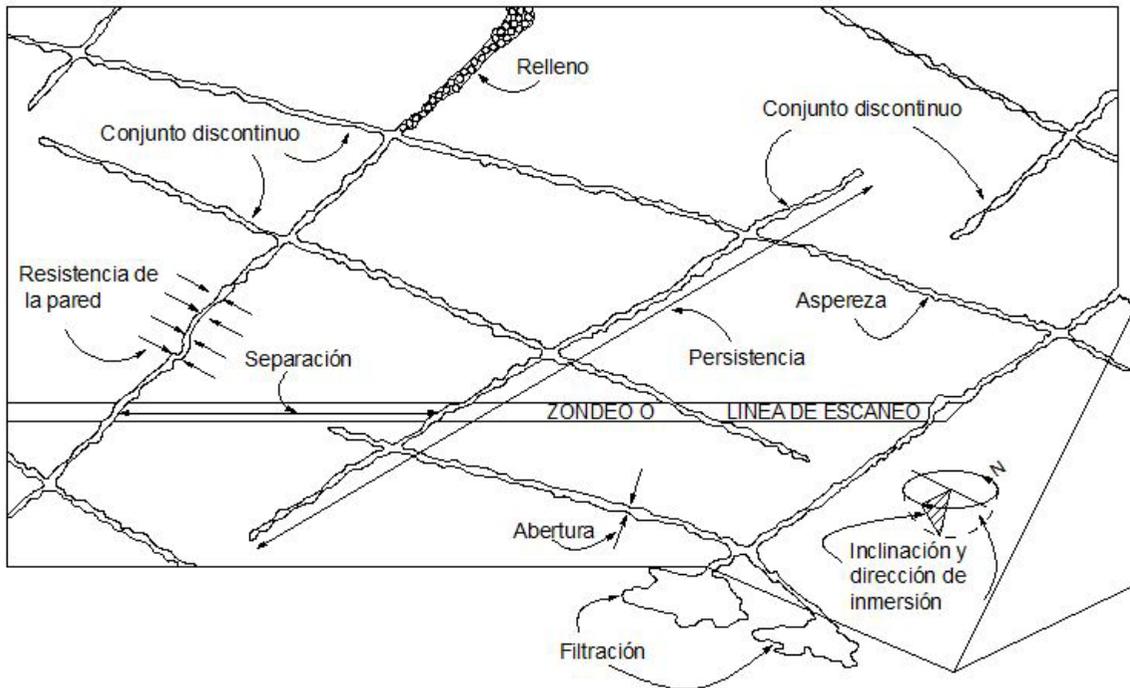


Figura 131. Características importantes de las fracturas para la mecánica de rocas.

EJERCICIOS DE APLICACIÓN

Perfiles Estereográficos

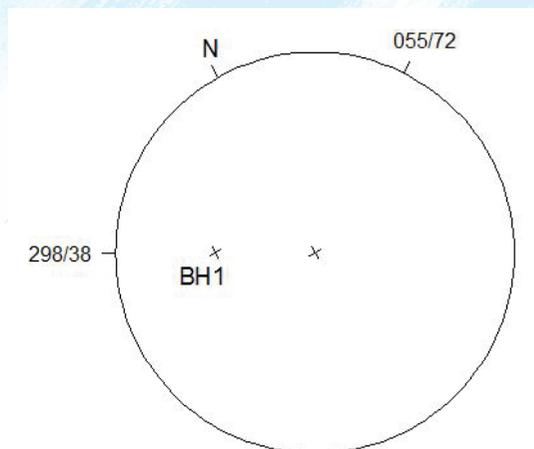
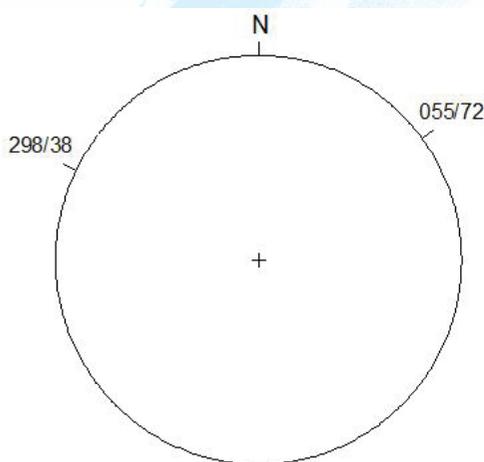
Ejemplos

Dos sondeos son perforados desde la cara de una cantera, la una en una orientación de 298/38, y la otra en una orientación de 055/72. En una hoja de papel calca sobre una proyección hemisférica, graficar los puntos correspondientes a estos sondeos, y luego determinar;

- (a) la orientación del plano que contiene los dos sondeos;
- (b) los ángulos agudos y obtusos entre los dos sondeos
- (c) la orientación de un sondeo que bisece el ángulo agudo; y
- (d) la orientación de un sondeo que es perpendicular a los dos agujeros ya perforados.

Respuesta Con el fin de mostrar los pasos involucrados en la solución de los problemas típicos de proyección hemisférica, aquí se presentan diagramas que muestran cada etapa de la solución de la pregunta de ejemplo. Cuando se utiliza el método de proyección hemisférica, se coloca una hoja de papel calca sobre la proyección y se hace girar alrededor de un pasador de dibujo que sobresale de debajo a través de la proyección y del papel calca. Los diagramas son el trabajo sobre el papel calca utilizado sobre la proyección hemisférica, con el perímetro de la red incluido como referencia.

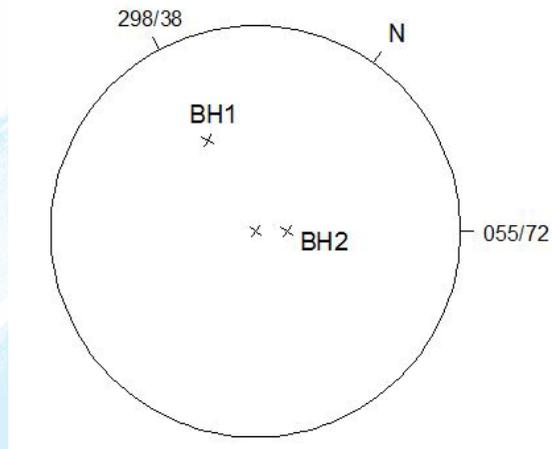
- (a) La orientación del plano que contiene los dos sondeos



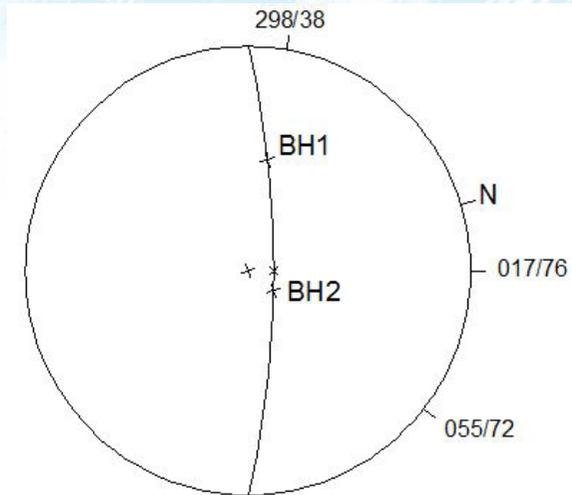
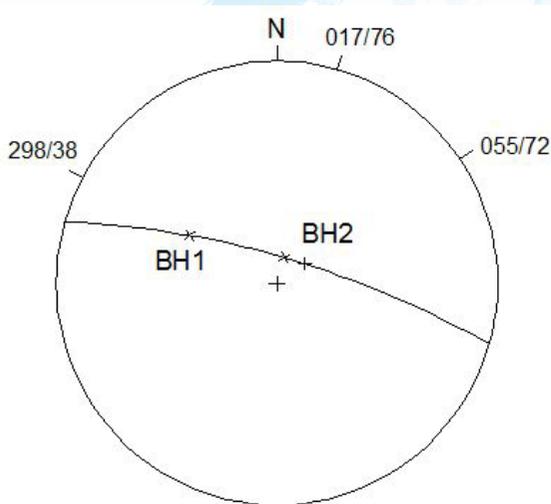
Marque el punto norte, dibujar marcas de verificación en la periferia en los azimut de sondeo de 298° y 055° , y anotar las orientaciones del sondeo.

Gire el papel calca hasta que la señal de sondeo 1, BH1, este en la línea E-O. Medir en 38° , marcar y etiquetar una cruz para este sondeo como BH1.

Gire el papel calca hasta que la señal para BH2 este en la línea E-O. Medir en 72° , marcar y etiquetar una cruz para BH2.

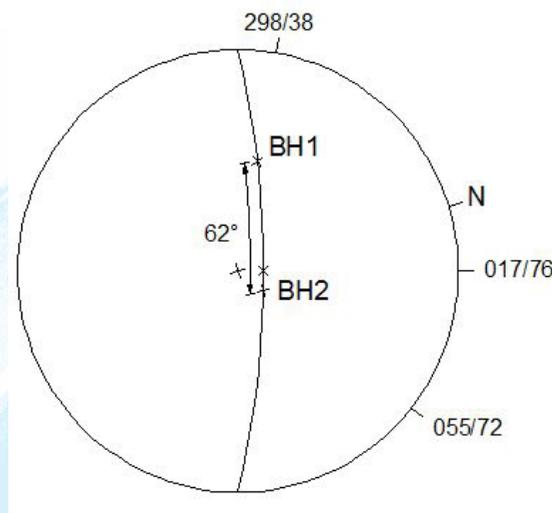


Gire el papel calca para que las cruces BH1 y BH2 se encuentren en el mismo círculo. Dibuje el gran círculo y una cruz en su máxima inmersión. Coloque una marca en la periferia frente a esta cruz, y escribir al lado el ángulo de inclinación del plano (que se encuentra medido desde la periferia a la línea de máxima inmersión).



Finalmente, gire el papel calca hacia el norte, medir la dirección de inmersión del plano y escribir en frente el ángulo de inclinación. Por tanto, la orientación del plano se encuentra en 017/76.

(b) Los ángulos agudos y obtusos entre los dos sondeos

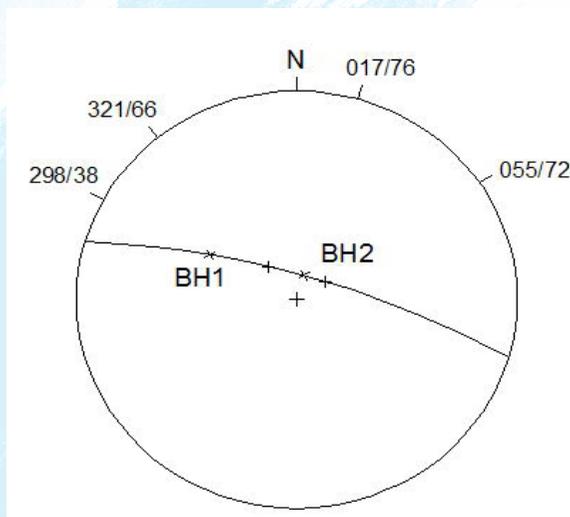
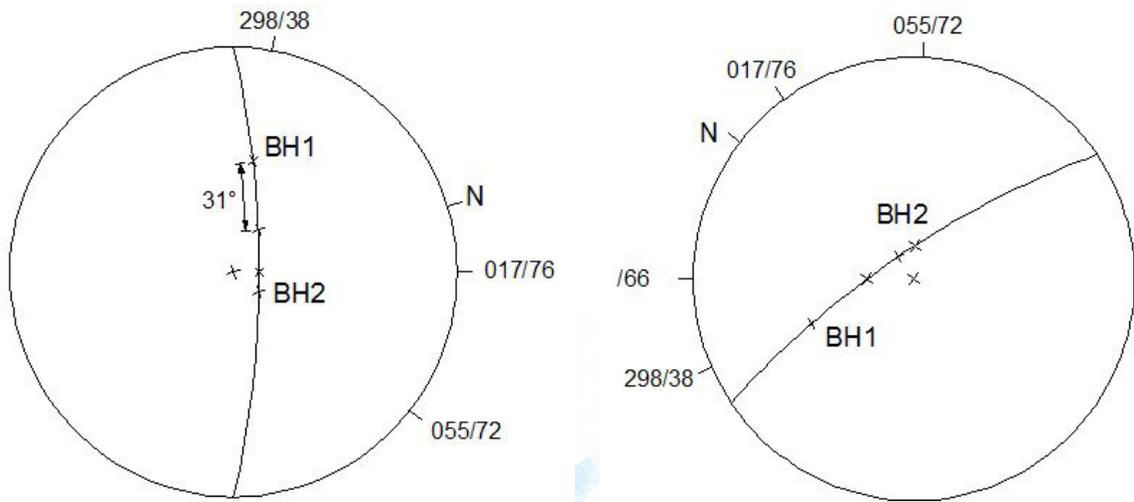


Gire el papel calca para que el plano que contiene BH1 y BH2 se encuentre en el gran círculo. Mida a lo largo del gran círculo, usando los círculos pequeños para medir, para determinar el ángulo entre BH1 y BH2. Es 62° , y ya que es menor de 90° es un ángulo agudo. El ángulo obtuso es el complemento de este, es decir, 118° . Esta figura también se puede encontrar mediante la suma de los ángulos entre BH1 y la periferia superior, y BH2 y la periferia inferior.

(c) La orientación de sondeo que biseca el ángulo agudo

La bisectriz aguda está a medio camino entre BH1 y BH2 a lo largo del gran círculo que representa el plano 017/76. Con el papel calca girado como se muestra, marcar una cruz a 31° con respecto a BH1 o BH2.

Gire el papel calca de manera que la bisectriz se encuentre en la línea E-O, marcar una señal en la periferia y escribir el paso de la línea a su lado.



Finalmente, gire el papel calca hacia N, y mida la tendencia de la bisectriz. La orientación de la bisectriz por lo tanto se encuentra a 321/66.

Fracturas y proyección hemisférica

- Se encontró que el RQD global de 134 m del núcleo de perforación es un 58%.
- (a) Calcular estimaciones para el número total de piezas de núcleo, y la longitud total de las piezas de núcleo que se podrían esperar a ser mayor de 0.1 m de largo.
- (b) ¿Cuántas piezas de núcleo podría esperarse que tenga una longitud superior a 0.2 m, y cuál es su longitud media?
- (a) Sabemos la longitud del núcleo, y así con el fin de calcular el número de piezas que tenemos para determinar la frecuencia de fractura (debido a que el número de piezas, N , se encuentra desde $N = \lambda L$). Como sabemos la RQD del núcleo y la concentración mínima en el que este se midió, podemos calcular la frecuencia de la fórmula fundamental para RQD, es decir,

$$RQD=100(\lambda t+1)\text{rxp}(-\lambda t).$$

Ecuación 68

Esta fórmula para RQD está implícita en λ (lo que significa que no se puede reorganizar para dejar λ por sí mismo en un lado de la ecuación), por lo que sólo se pueden resolver de forma iterativa (o por ensayo y error). Por lo tanto, con $RQD = 58\%$ y $t = 0.1$ m, encontramos que . Después de haber encontrado un valor para la frecuencia, se calcula el número total de fracturas presentes en el núcleo como

$$N_t = \lambda L = 14.344 \cdot 134 = 1922.2$$

Ecuación 69

y, como no puede existir una parte de una pieza, este resultado debe ser redondeado a 1922.

La definición de RQD es “la relación de la longitud total de las piezas de núcleo de más de 0.1 m de la longitud total del núcleo recuperado, expresado como porcentaje”. En este caso, el RQD es 58%, lo que representa directamente la proporción de núcleo compuesto de piezas de más de 0,1 m. A medida que la longitud total del núcleo es 134 m, la longitud total de estas piezas es entonces $0.58 \times 134 = 77.72$ m.

(b) El número de piezas cuyas longitudes individuales son mayores que 0.2 m se calcula a partir de la proporción del número total que comprende piezas de más de 0.2 m. A su vez, esta proporción se encuentra al calcular la probabilidad de encontrar un intervalo de núcleo sin fracturas sobre una longitud de 0.2 m.

Si nos muestra todo el núcleo fracturado, la probabilidad de encontrar una fractura debe ser 1. Esto se afirma matemáticamente como el área bajo la distribución de densidad de probabilidad, que es

$$\int_0^{\infty} \lambda \exp(-\lambda x) dx = 1.$$

Si sólo estamos interesados en un determinado rango de valores de espaciado, entonces esta integral es evaluada usando límites que representan el rango. Por lo tanto, para valores de espaciado entre 0 y un valor b tenemos

$$\Pr(x \leq b) = \int_0^b \lambda \exp(-\lambda x) dx = 1 - \exp(-\lambda b)$$

Ecuación 70

y, si sólo estamos interesados en los valores de espaciado mayor que b, entonces

$$\Pr(x > b) = 1 - \Pr(x \leq b) = 1 - [1 - \exp(-\lambda b)] = \exp(-\lambda b).$$

En el caso bajo consideración tenemos $b = 0.2$ m, dando

$$\Pr(x > 0.2) = \exp(-\lambda \cdot 0.2) = 0.057,$$

y a partir de esto, encontramos que el número de piezas de más de 0.2 m es

$$N_{0.2} = 0.057 \cdot N_t = 0.057 \cdot 1922 = 109.5,$$

que se redondea a 109.

Para calcular la longitud media de estas piezas, debemos conocer su longitud total. Esto se encuentra mediante la evaluación de la RQD para una concentración mínima de 0.2 m,

$$RQD_{0.2} = 100(14.344 \cdot 0.2 + 1) \exp(-14.344 \cdot 0.2) = 22.0\%,$$

Y luego calcular la longitud total como

$$L_{0.2} = RQD_{0.2} \cdot L_t = (22.0/100) \cdot 134 = 29.4 \text{ m.}$$

Ecuación 71

La longitud media de las piezas es entonces

$$\bar{x}_{0.2} = \frac{L_{0.2}}{N_{0.2}} = \frac{29.4}{109} = 0.27 \text{ m}$$

Ecuación 72

Esta media es mucho mayor que la media de todas las piezas (que es el recíproco de la frecuencia, o 0.07 m), y por lo que es interesante ver cómo esta longitud media varía con el umbral que elegimos. El diagrama siguiente muestra esto.

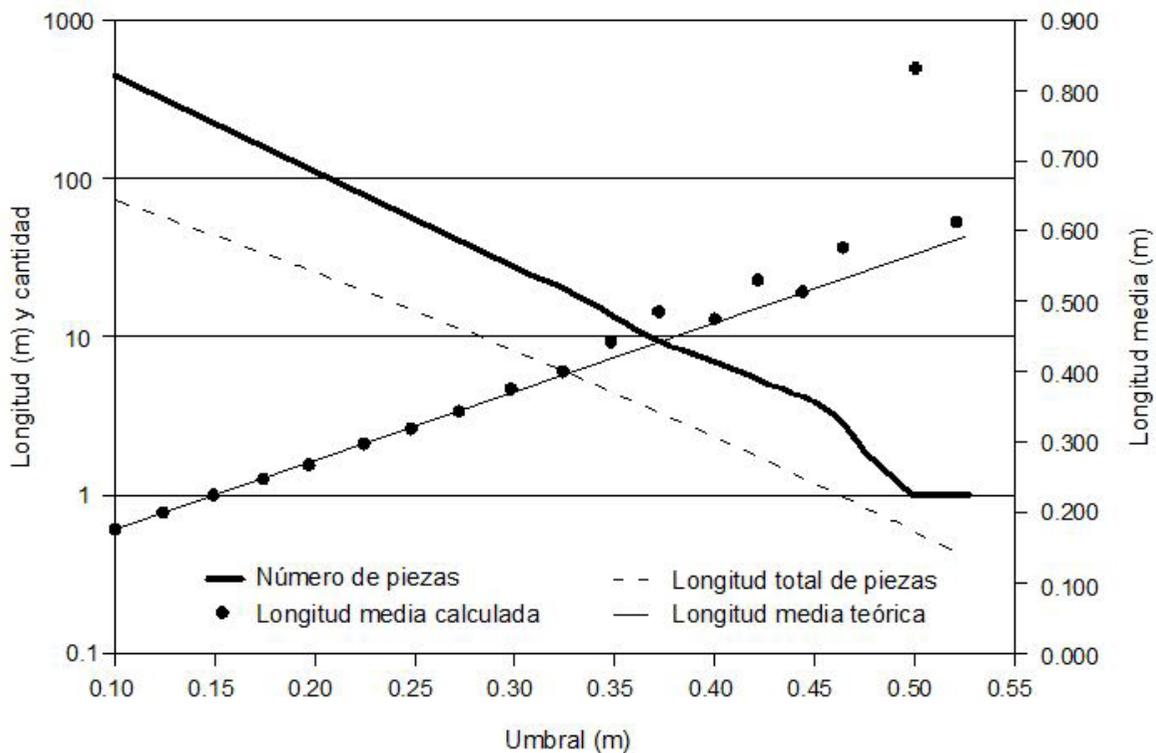


Figura 132 umbral vs longitud

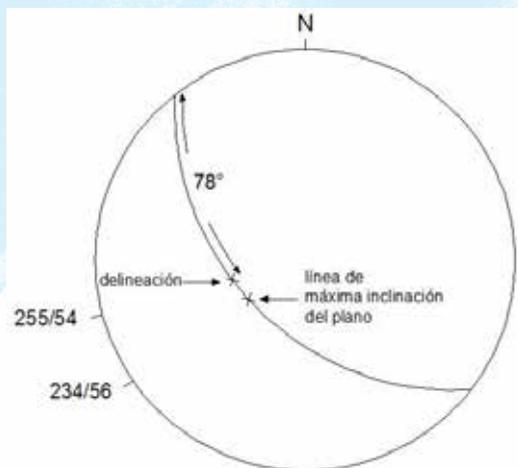
En esta parcela la longitud media se ha calculado como se muestra arriba, pero debido a que el número de piezas se ha redondeado hacia abajo, los puntos no se encuentran en la curva teóricamente derivada de $\bar{x} = t + (1/\lambda)$.

Observe que el error se hace más grande cuando el número de piezas se reduce. Esto es porque el cambio de 2 piezas a 1 es un cambio de porcentaje mucho mayor que a partir de 500 piezas a 499. Además, el umbral no se puede aumentar más allá de lo que se muestra, debido a que el número de piezas se reduciría a cero.

Un plano de falla con la orientación de 234/56 ha sido descubierto durante una investigación de sitio. Una inspección más cercana muestra que las alineaciones de superficie tienen una inclinación de 78° medidos desde la línea en dirección noroeste. ¿Cuál es la tendencia y la caída de estas alineaciones?

La siguiente ilustración muestra el diagrama de papel calca final obtenido al contestar esta pregunta. Los pasos seguidos en su construcción se dan de la siguiente manera.

- (1) Trazar y etiquetar una marca de verificación para el plano de falla. Gire la marca de la señal a la línea este-oeste, medir en 56° y marcar una cruz por la línea de máxima inmersión. Dibujar el círculo máximo correspondiente al plano de falla. Gire el papel calca hacia el norte.



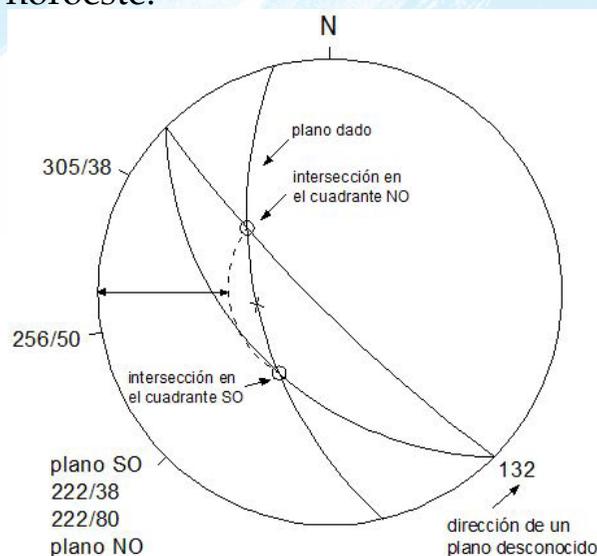
- (2) La inclinación de la delineación se mide desde la línea en dirección noroeste. Gire el papel calca para que el extremo noroeste del gran círculo sea el norte. Medir la inclinación de la delineación (es decir, 78°) a lo largo del gran círculo, usando los pequeños círculos como una escala y marcar una cruz en el gran círculo; esto representa la orientación de la delineación.

- (3) Gire el papel calca para que la delineación esté en la línea este-oeste, marcar una señal en la periferia frente a esto, medir y marcar al lado de la señal el paso de la delineación; es 54° .
- (4) Gire el papel calca al norte, y mida la tendencia de la delineación; es 255° . Por tanto, la orientación de la delineación (dado como tendencia y por penetración) es 255/54.

La línea de intersección entre dos planos de tendencias es al noroeste aproximadamente y la inmersión a 38° . La orientación de uno de los planos es 256/50, y la dirección de la otra es de 132° . ¿Cuál es la tendencia de la línea de intersección y cuál es la inmersión del segundo plano?

La siguiente ilustración muestra el diagrama del papel calca final obtenido al responder a esta pregunta. Los pasos seguidos en su construcción se dan de la siguiente manera.

- (1) Trazar y etiquetar marcas de verificación para la inmersión máxima del plano 1 y la dirección del plano 2. Girar la marca de verificación para el plano 1 a la línea este-oeste, medir en 50° y marcar una cruz por la línea de máxima inmersión. Dibujar el gran círculo que corresponde al plano 1, y gire el papel calca hacia el norte.
- (2) Dibuje un arco circular alrededor del cuadrante noroeste del papel calca, centrado en el centro del papel calca a una distancia desde la periferia igual a la inmersión de la línea de intersección, 38° . Este arco representa el lugar geométrico de líneas con una inclinación de 38° y la tendencia en el cuadrante noroeste.



- (3) Gire el papel calca para que la intersección del arco circular y el gran círculo al plano 1 esté en la línea este-oeste, y marcar una señal en la periferia. Esto representa la tendencia de la intersección.
- (4) Gire el papel calca para que la dirección del plano 2 este en la línea norte-sur, y dibujar el gran círculo que pasa a través de la intersección. Este es el gran círculo al plano 2. Marque una señal en la periferia frente a la línea de máxima inmersión, medir la inmersión del plano 2 y marcar al lado de la señal. Es 80° .
- (5) Gire el papel calca hacia el norte y medir la tendencia de la intersección y la dirección de inclinación de plano 2; esto da las respuestas 305° y 222° , respectivamente.

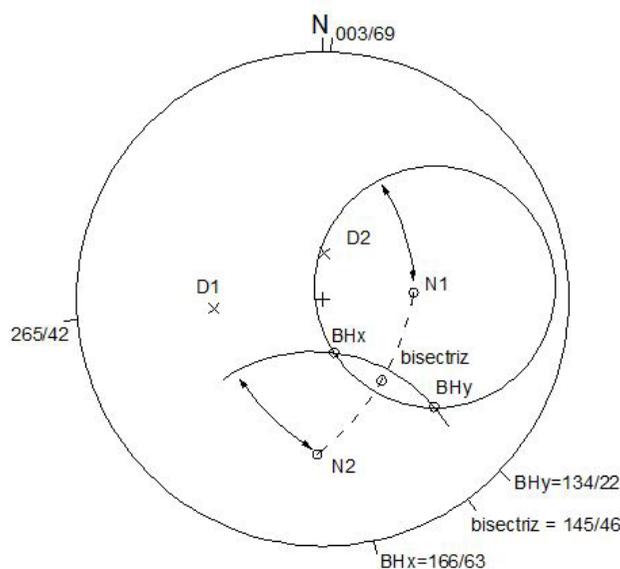
La orientación del plano 2 es entonces 222/80, y la orientación de la línea de intersección del plano 1 y el plano 2 es 305/38.

El diagrama muestra que hay una segunda línea de intersección entre el lugar geométrico circular y el plano dado, y el plano que pasa a través de esto tiene una orientación de 222/38. Sin embargo, la intersección se forma en el cuadrante SO, no en el cuadrante NO como se ha dicho, y así se puede descartar.

Se conoce una masa de roca que contiene dos conjuntos de fracturas, las orientaciones de los cuales son 265/42 y 003/69. ¿Qué orientaciones de sondeo le permitirá a uno perforar a través de la masa de roca e intersectar todas las fracturas en un ángulo de 45° (medido entre el eje de sondeo y la normal a las fracturas)? ¿Cuál es el ángulo mínimo en que todas las fracturas pueden intersectarse?

La proyección muestra la solución final a esta pregunta. Los pasos a seguir se describen a continuación.

- (1) Trazar y etiquetar las marcas de verificación para los dos conjuntos. Gire la marca de verificación para el conjunto 1 de la línea este-oeste, medir en 42° y marcar una cruz por la inmersión máxima de conjunto 1. Medir 90° a través de la línea este-oeste y marca y etiqueta la posición de la normal al conjunto 1. Gire la marca de verificación para el conjunto 2 de la línea este-oeste, medir en 69° y marcar una cruz para la inmersión máxima del conjunto 2. Mida a través de la línea este-oeste 90° y marcar y etiquetar la posición de la normal al conjunto 2.



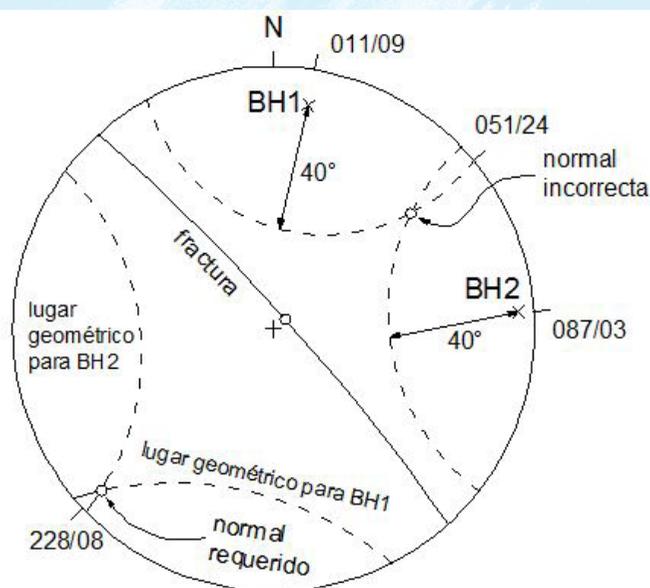
- (2) Construir un círculo alrededor de la normal al conjunto 1 a una distancia angular de 45° . Para ello, coloque la normal en un gran círculo, y contar en cualquier dirección a lo largo del gran círculo con un ángulo de 45° . Gire el papel calca unos pocos grados, coloque la normal sobre otro gran círculo, y mida y marque dos puntos más. Continúe de esta manera hasta que sean marcados suficientes puntos para permitir que el lugar geométrico circular alrededor de la normal se puede dibujar (nota ¡que los pequeños círculos en la red de proyección se pueden utilizar como plantillas de círculo si se levanta la hoja proyección de gráfico!).
- (3) Utilizando la normal al conjunto 2, dibujar las partes del círculo a una distancia angular de 45° desde la normal que se intersecan el círculo alrededor de la normal 1. Etiquetar los dos puntos de intersección de estos círculos BH_x y BH_y , gire el papel calca de modo que es traído a la línea este-oeste, a su vez, y medir la orientación de las líneas. Estos puntos son las orientaciones de las dos perforaciones que subtienden un ángulo de 45° a ambos conjuntos de fractura, y son $166/63$ y $134/22$.
- (4) Gire el papel calca para que la normal 1 y normal 2 estén en el mismo gran círculo. Medir el ángulo entre la normal, 80° , dividir por 2, y trazar la bisectriz. Gire el papel calca para que la bisectriz esté en la línea este-oeste, y después medir su orientación: $145/46$. Esta es la orientación de la perforación que hace que el ángulo mínimo para cada conjunto de fractura, y este ángulo es de 40° .

Se sabe que un depósito de petróleo contiene numerosas fracturas que son altamente conductivas. Estas fracturas se sumergen casi verticalmente en dirección noreste. Para maximizar la producción del depósito, los pozos de producción deben ser desviados para ejecutar sub-horizontalmente, de modo que las fracturas se intersecten tan cerca de la perpendicular como sea posible.

Con el fin de determinar la orientación óptima de los orificios de producción, dos pozos de prueba se han perforado para orientar las fracturas. Las orientaciones de estos agujeros de prueba dentro del depósito son 011/09 y 087/03, y los envasadores de impresión los cuales están fuera de uso muestran que en ambos agujeros el ángulo entre la normal a las fracturas y el eje axial del orificio es de 40° . Determinar la orientación de las fracturas, y la tendencia requerida de los agujeros de producción.

Para encontrar la orientación de la normal a las fracturas, dibujamos círculos a una distancia angular de 40° con respecto a cada una de las orientaciones del sondeo, y localizar las intersecciones de estos círculos. Sólo una de estas dos intersecciones estará en la orientación apropiada, pero esto será evidente una vez que las hemos encontrado.

- (1) Dibuje las marcas de verificación para los dos sondeos, gire cada marca de la señal a la línea este-oeste, a su vez, y marcar la posición de los sondeos en el papel calca.



- (2) Para cada sondeo, a su vez, hacer un bosquejo tanto como sea posible de un círculo a una distancia angular de 40° ; la intersección de estos dos círculos se encuentra en el cuadrante noreste de la proyección. Gire el papel calca para que la intersección esté en la línea este-oeste, trazar una marca de verificación en la periferia y escribir junto a ella el paso de la intersección, 24° .
- (3) Gire el papel calca hacia el norte y mida la tendencia de la intersección, 051° .
- (4) Una normal con una orientación de $051/24$ medido representa un plano que se sumerge hacia el suroeste a bajo ángulo (la orientación del plano es $231/66$). Sin embargo, sabemos que las fracturas sumergen hacia el noreste y son casi verticales, lo que claramente no es la orientación que se encontró. Para resolver este problema, hay que sacar las porciones de los círculos alrededor de los sondeos que se encuentran en los lados oeste y sur de la proyección.
- (5) Dibuje con cuidado las partes restantes de los círculos contando 'a través de' la proyección. Esto implica medir hacia la periferia a lo largo de un gran círculo, y luego contando a lo largo del gran círculo complementaria desde el lado opuesto de la proyección por el ángulo restante, de manera que la distancia total es de 40° . Cuando se haya completado para ambos círculos, la intersección se encuentra hacia el suroeste de la proyección.
- (6) Gire el papel calca para que la intersección esté en la línea este-oeste, marcar una señal en la periferia y anote el paso de la intersección, 08° .
- (7) Girar el papel calca hacia el norte y medir la tendencia de la intersección, 228° . Por lo tanto, la orientación de la normal a las fracturas es $228/08$ y por lo tanto la dirección de inmersión y ángulo de inclinación de las fracturas son $048/82$. Esto concuerda bien con la orientación conocida de las fracturas: inmersión hacia el noreste en un ángulo pronunciado.
- (8) La tendencia de los agujeros de producción es el de la tendencia de la normal a las fracturas, y de que sea 048° o 228° . Dos orientaciones son posibles, debido a que los agujeros son sub-horizontales y por lo tanto pueden funcionar en dos direcciones. En cualquier caso, el ángulo entre la normal a las fracturas y los ejes de las perforaciones será de 8° .

Aplicación en Software Dips

En el talud de las palmas, durante el levantamiento de estaciones geomecánicas para la caracterización del macizo rocoso se recolectaron 38 datos estructurales; la interpretación y distribución de los polos se la efectuó con el Software Dips v5.1.

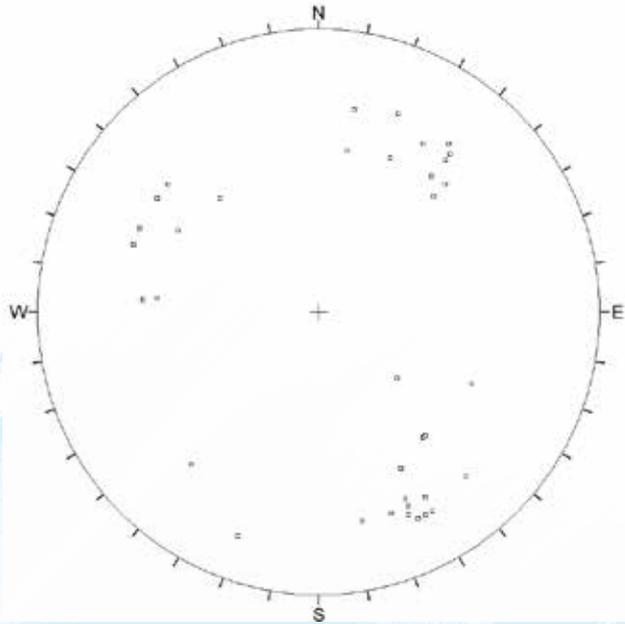
1. Crear un nuevo archivo en el software Dips y transcribir los datos levantados de las estaciones geomecánicas

Dip	Dip Direction	ESPACIADO	CONTINUIDAD	APERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	METEORIZACION	FILTRACIONES	TIPO
56	139	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Lig. Meteorizada	Seco	Estratificac
60	190	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Estratificac
64	94	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Juntas
70	40	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Estratificac
62	205	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Duro (<5 mm	Fresca	Seco	Estratificac
60	95	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Duro (<5 mm	Fresca	Seco	Juntas
64	220	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Duro (<5 mm	Fresca	Seco	Estratificac
70	212	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Duro (<5 mm	Fresca	Seco	Estratificac
70	125	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Duro (<5 mm	Fresca	Seco	Juntas
72	190	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Estratificac
70	110	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Juntas
70	220	Extremadament	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Mod. Meteorizada	Seco	Estratificac
60	225	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Estratificac
65	225	Extremadament	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Fresca	Seco	Estratificac
40	310	Extremadament	Baja continuidad,1	Abierta,0,5-2,	II Esc. Lisa	Blando (<5 m	Mod. Meteorizada	Seco	Fallas
80	20	Extremadament	Baja continuidad,1	Parcialmente a	II Esc. Lisa	Blando (<5 m	Mod. Meteorizada	Seco	Fallas
70	220	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Rugos	Sin relleno	Fresca	Seco	Estratificac
70	115	Muy junto,20-60	Baja continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (>5 m	Fresca	Seco	Juntas
60	120	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Abierta,0,5-2,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Lig. Meteorizada	Seco	Juntas
74	202	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (>5 m	Mod. Meteorizada	Seco	Estratificac
74	218	Muy junto,20-60	Continuidad media,	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Fresca	Seco	Estratificac
70	130	Separado,600-	Continuidad media,	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Sin relleno	Fresca	Seco	Juntas
72	220	Extremadament	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Fresca	Seco	Estratificac
60	225	Muy junto,20-60	Alta continuidad,1	Parcialmente a	VII Plana Lisa	Blando (<5 m	Fresca	Seco	Estratificac
60	320	Extremadament	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Lig. Meteorizada	Seco	Juntas
62	295	Extremadament	Alta continuidad,1	Cerrada,0,1-0,	VII Plana Lisa	Sin relleno	Fresca	Seco	Estratificac
60	319								Grieta trac
76	318								Grieta trac
76	336								Grieta trac
74	348								Grieta trac
74	340								Grieta trac
78	330								Grieta trac
64	332								Grieta trac
74	335								Grieta trac
76	334								Grieta trac
78	332								Grieta trac
72	335								Grieta trac
74	330								Grieta trac

2. Una vez transcrito los datos, en la barra de menú del programa daremos a la opción pole plot



3. la distribución de los polos

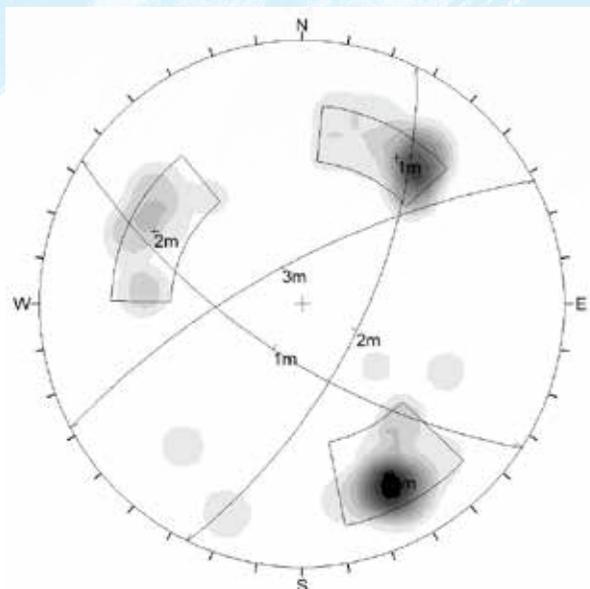


4. Se identifican 3 tipos de concentraciones (NE, NW, SE)

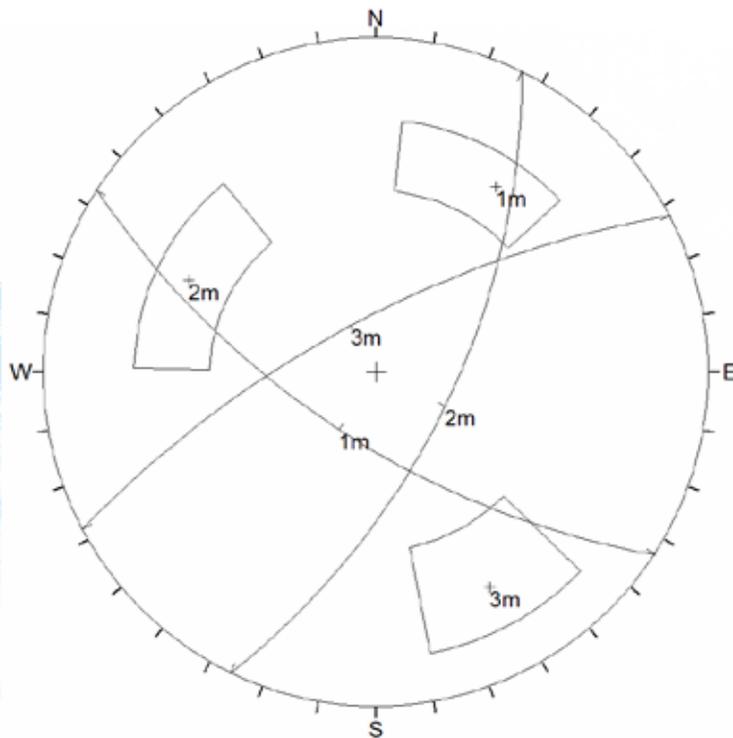
5. Mediante la opción add plane en la barra de menú del programa, agruparemos estas concentraciones



6. Se deberá ser lo más preciso posible para agrupar estas concentraciones



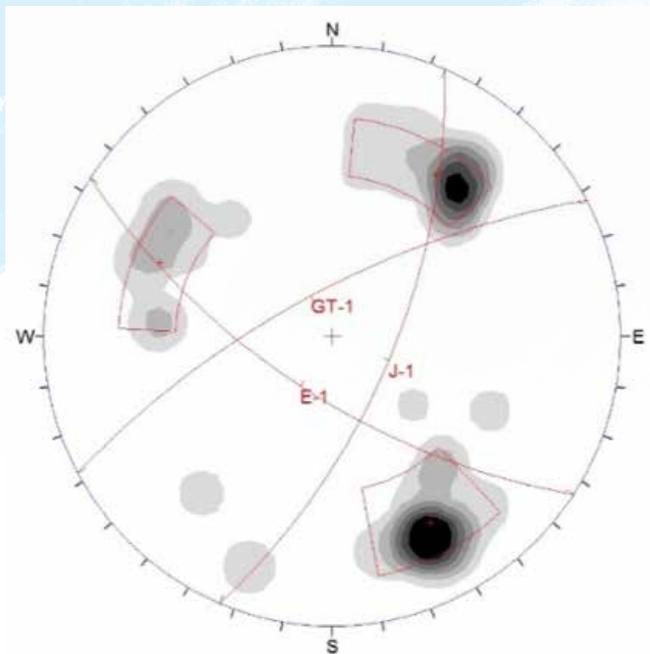
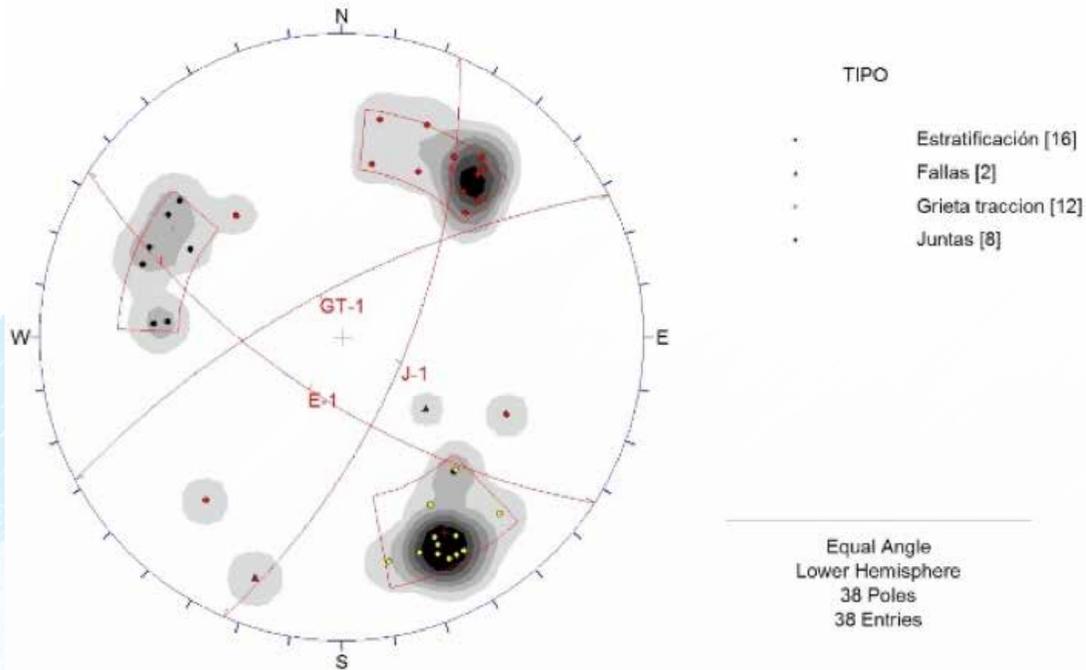
7. Podemos conocer el azimut de buzamiento/buzamiento de estas concentraciones mediante la opción major planes plot en la barra de menú del programa DIPS



Orientations		
ID	Dip	Direction
1	m	67 / 213
2	m	64 / 116
3	m	72 / 332

Equal Angle
Lower Hemisphere
38 Poles
38 Entries

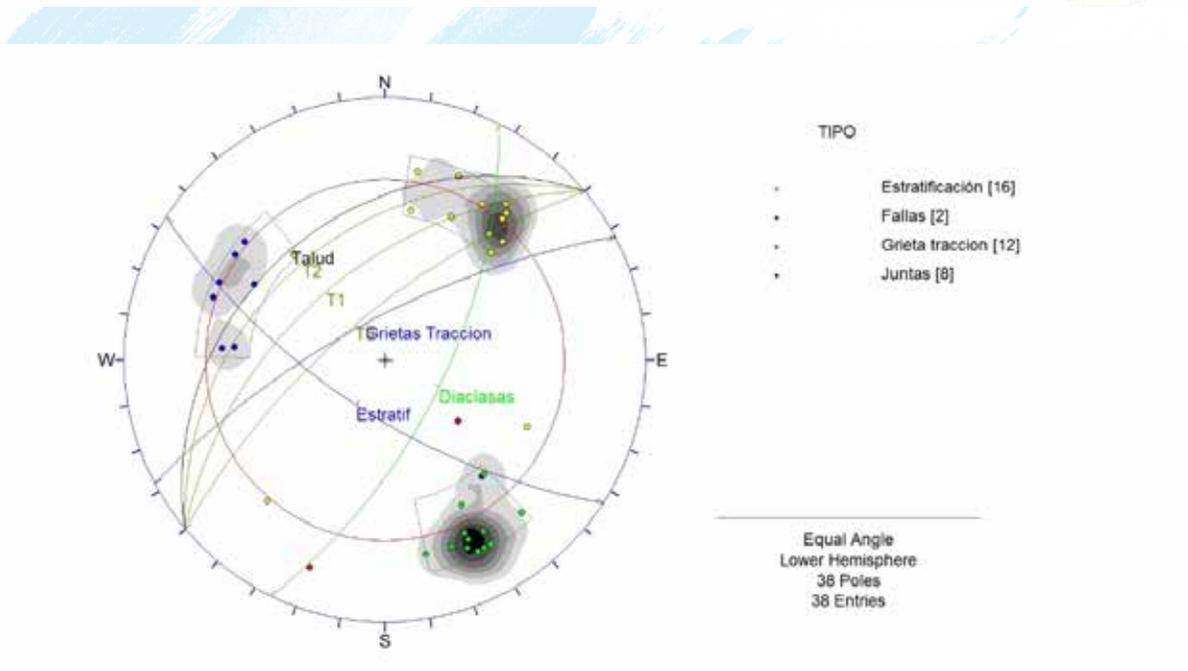
8. Se identificó tres familias de discontinuidades las cuales son: estratificación, grietas de tracción y juntas que se las denomina respectivamente como: E-1, GT-1, J-1 como se observa en la figura



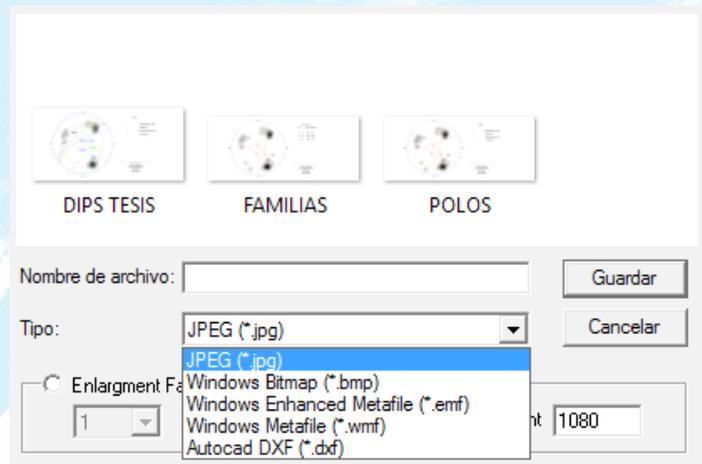
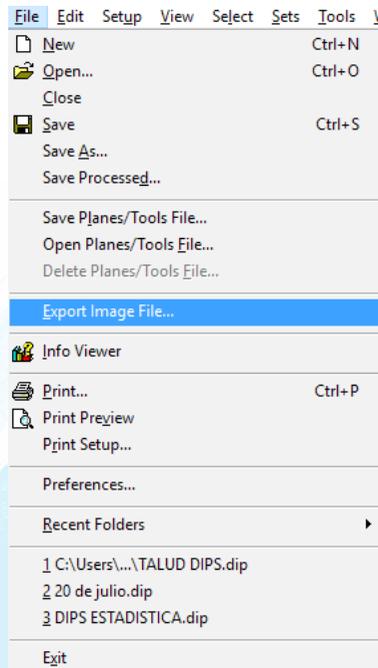
9. Con la opción add set (circle) en la barra de menú, podemos insertar el ángulo de fricción del suelo. Para el talud de las palmas encontramos un ϕ de 23.3° .



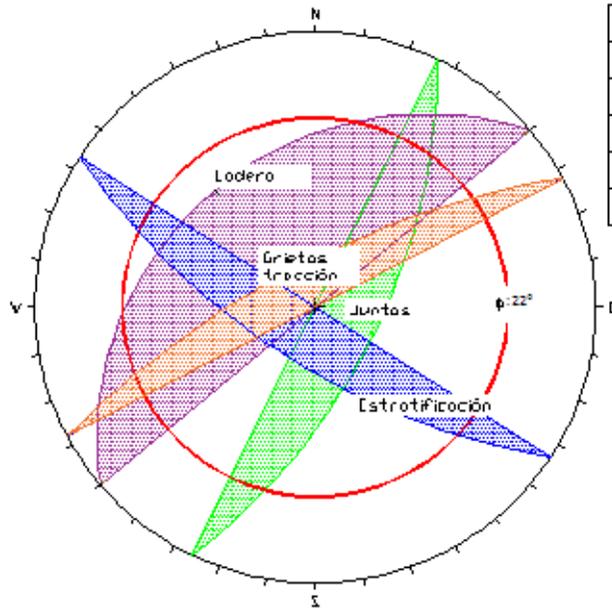
10. Podemos representar también a la ladera como un polo, con los datos de azimut de buzamiento/buzamiento de la misma, mediante la opción add plane en la barra de menú del programa



11. Finalmente, el programa nos da la opción de exportar el estereodiagrama como una imagen, como un .dxf, bmp, etc.



12. Se escogió la opción de exportarlo como DXF y modificar el estilo del estereodiagrama, obteniendo el siguiente resultado final.



Orientación de las discontinuidades		
Familia	Rumbo/buzamiento	Azimet buz/buzamiento
E-1	N57°W/67°SW	213/67
GT-1	N60°E/72°NW	332/72
J-1	N23°E/66°SE	113/66
L-1	N50°E/32°SW	320/32

Bibliografía

Norma ASTM D 5607. (s.f.). Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D5607.htm>

Ambraseys NN, Douglas J (2003) Effect of vertical ground motions on horizontal response of structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*.

Andrus RD, Stokoe KH (2000) Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*

Alfonso Muñoz Martín. (s.f.). *Elementos de Prospección Sísmica*.

Antino F, P. (2008). *Cálculo de las Tensiones Principales en el Plano y en el Espacio-Círculo de Mohr*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de Plata.

Badillo, J. (2005). *Mecánica de Suelos*. México : Limusa.

Bieniawski. (1979). *Clasificación Geomécanica Bieniawski o RMR*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.

Bray JD, Travasarou T (2007) Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Caminosca, C. (2009). *Ensayo permeabilidad "Lugeón"*. Quito .

Carver GA, McCalpine JP (1996) Paleoseismology of compressional tectonic environments. In: McCalpin JP (ed) *Paleoseismology*. Academic Press.

Castro G (1969) *Liquefaction of sands*. Harvard Soil Mechanics series 87, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

Day R. W. (2002) *Geotechnical Engineering Handbook*, McGraw-Hill Handbooks.
Das BM (1985) *Advanced Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Co., Singapore

E, Saez. (2010). *Fundamentos de Geotecnia*. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería Estructural y Geotecnia.

Estrada, L. A. (2008). *Prospección Sísmica*. San Miguel de Tucuman, Argentina: Universidad Nacional de Tucuman.

FJ Alfonso, S. d. (1985). *Velocidad de Propagación de Ondas en Rocas Carbonadas*. Universidad de Oviedo, Trabajos de Geología.

Finn WDL (1999) *Evolution of dynamic analysis in geotechnical earthquake*

engineering. In: New approaches to liquefaction analysis. Transportation Research Board 99 Workshop, Washington

Giner J, M. S. (2001). Sismica y Riesgo Sismico en la C.V.C. Alicante, España: Club Universo.

Hunt, R. E. (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices. McGraw-Hill.

Juan B. Puig2. (2005). Geología Aplicada a la Ingeniería Civil Y Fotointerpretación. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mexico: Autonomous University of Nuevo León.

NCh1517/1.Of1979. (1979). Mecánica de Suelos-Límites de consistencia- Parte1.: Determinación del límite líquido.

NCh1517/2.Of1979. (1979). Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia-parte 2. Determinación del límite plástico.

Norma ASTM D 2216. (1998). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

P. Weidelt et al. (1972). The Inverse Problem of Geomagnetic Induction. Wurzburg, Germany.

Pacheco, P. I. (2007). Clasificaciones Geomécánicas del macizo rocoso y aplicaciones para el túnel de conducción del proyecto Hidroeléctrico "San Francisco". Quito.

Poulos, H. a. (1974). Elastic Solutions for Soil and Rocks Mechanis. New York Wiley : Series in soil engineering.

Rotstein, Goldberg and. (1982). Prediction of Sorptional Equilibrium Data for Starch-Containing Foodstuffs. Great Britain: Chemical Engineering Science.

Schnabel, P. B. and Seed, H. B. Acceleration in rock for earthquakes in Western United States, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 2, 1973.

Seed H.B. and Lee K.L. (1966), "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading" ASCE, JGE, Vol. 92, No. SM 6, pp 105-134.

Terzaghi K. (1943), "Theoretical soil mechanics" John Wiley and Sons, New York.

Vesic A.S. (1973), "Analysis of ultimate loads of shallow foundation" Journal of Soil mechanics and Foundations division, ASCE, Vol. 99, SM1, pp 45-73.

Sherad, J.L y Decker, R.S. (1976). Suelos Dispersivos.

Skempton, A. a. (1957). A contribution to the settlement analysis of foundations on

clay. Geotechnique . Oxford OX1 3BD, Reino Unido: Geotechnical Engineering.

Vallejo, V. I. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educacion .

Weidelt et al. (1980). Continental Rifts:Evolution, Structure, Tectonics.

SITIOS WEBS

http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.2._Geotecnia_tcm7-213272.pdf

<https://civil.uniandes.edu.co/Boletin/index.php/k2/item/4-articulo-cientifico-geosi-geotecnia-e-infraestructura-vial>

<http://www.corforiolorado.gov.ar/archivos/tecnicatura/2do/fundamentos/und2>.

http://conservacion.cimmyt.org/es/component/docman/doc_view/1142-chs

<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAII.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf>

https://www.uam.es/docencia/ocw/cursos/ginerriesgo/Riesgo_sismico

http://www.academia.edu/7004364/GEOTECNIA_Y_LA_INGENIERIA_CIVIL._GEOTECHNIA_AND_CIVIL_ENGINEERING

http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos_lab/guia6_CIENCIAS_DE_LA_VIDA_ELASTICIDAD_POR_TRACCION-LEY_DE_HOOKE. (Juan B. Puig2, 2005)

Publicaciones Científicas

ISBN: 978-9942-765-29-1



9 789942 765291



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA