
Curso MINERÍA

Profesor: Dr. Julián M. Ortiz



fcfm

Ingeniería de Minas
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Aspectos geomecánicos

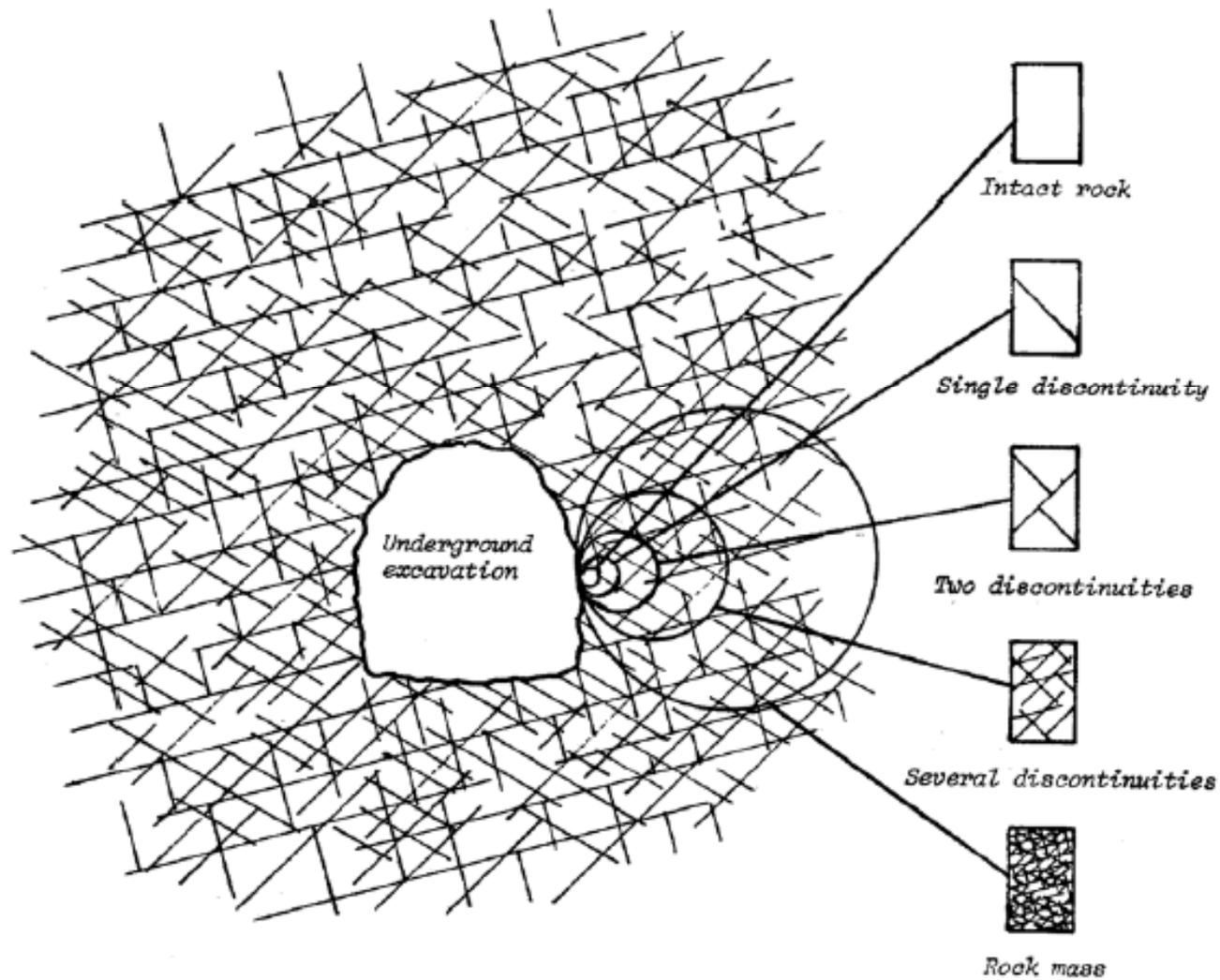
Definiciones

- **Mecánica**: área de la física que estudia el efecto de las fuerzas sobre los cuerpos.
- **Mecánica de rocas**: rama de la ingeniería que estudia el efecto de las fuerzas sobre las rocas.
- **Roca**: parte sólida de la corteza terrestre formada por bloques sólidos y duros de gran tamaño, encajados y ligados entre sí. Agregado de minerales.
- **Suelo**: acumulación de partículas de pequeño tamaño (hasta 3 o 4") y sin una ligazón fuerte entre sí.
- **Discontinuidades (joints)**: cualquier tipo de fractura en la roca. Son planos de fragilidad.

Definiciones

- **Macizo rocoso** (rock mass): gran masa de roca componente de la corteza terrestre. Está compuesto por:
 - **Roca intacta**: el volumen de roca que se encuentra entre las discontinuidades. También se llama matriz rocosa o sustancia rocosa.
 - **Discontinuidades**: fallas, diaclasas, planos de fractura, de clivaje, etc.

Definiciones



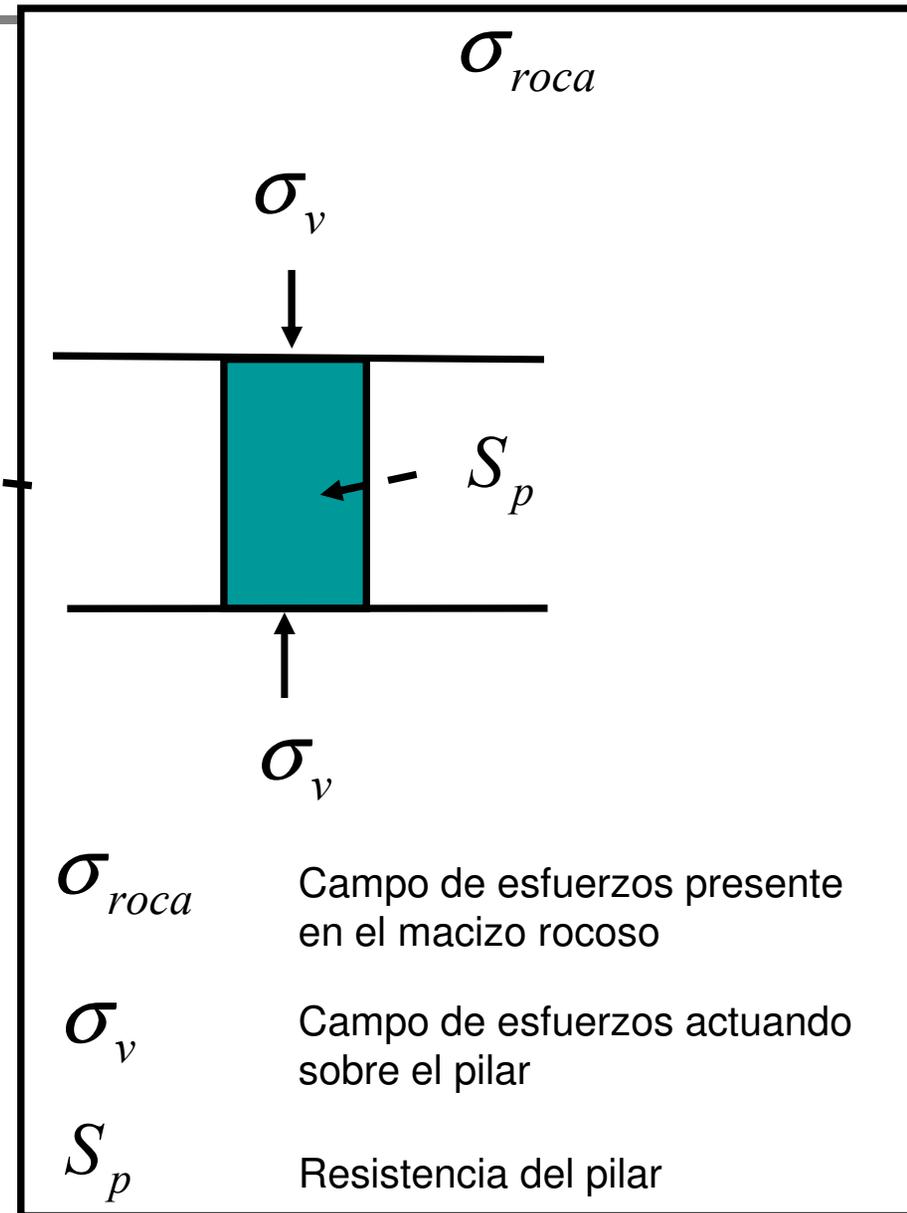
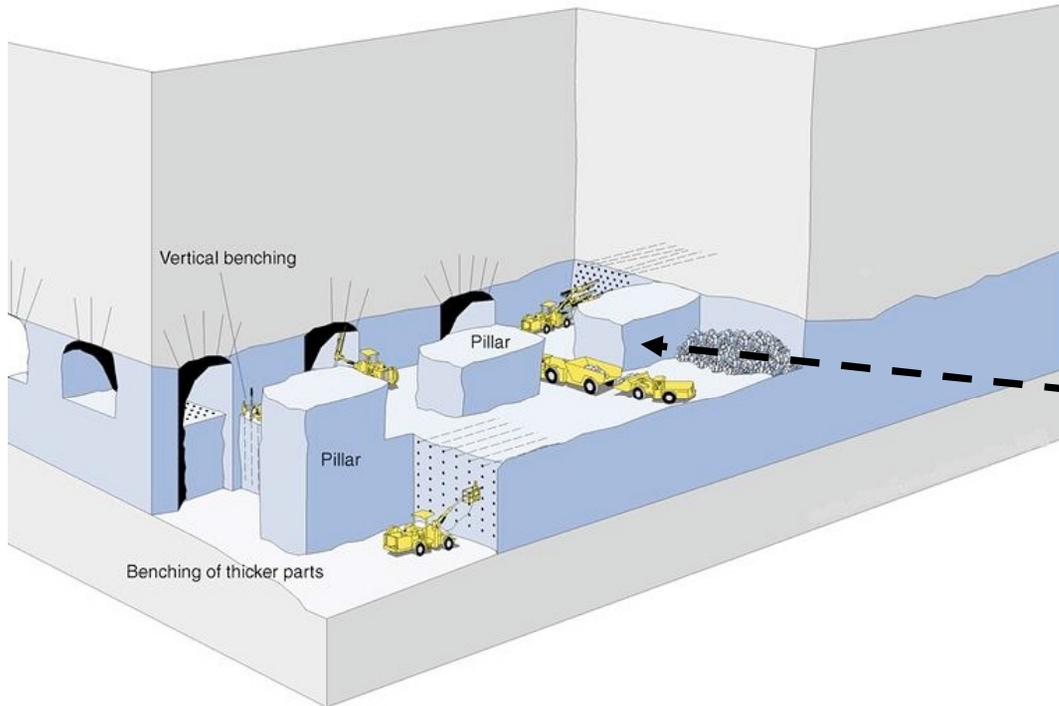
Definición formal

- **Mecánica de rocas** (US National Committee on Rock Mechanics, 1964, 1974):

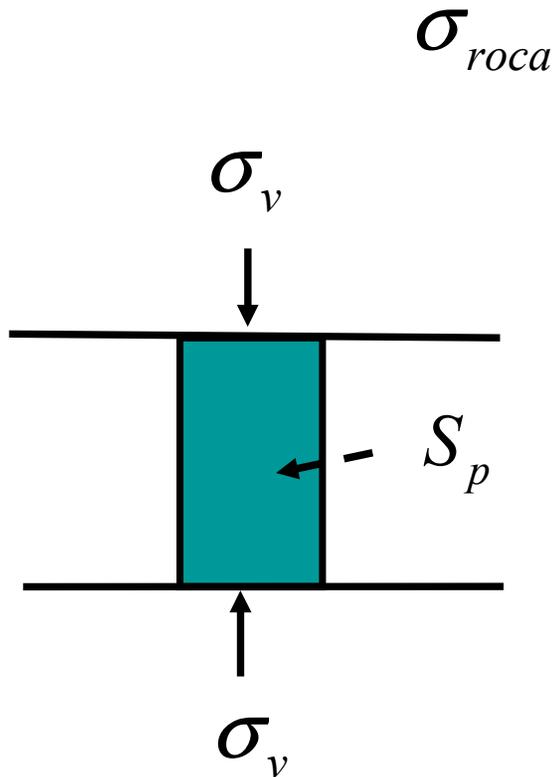
“La mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de la roca y de los macizos rocosos. Corresponde a la rama de la mecánica que estudia la respuesta de la roca y del macizo rocoso a los campos de fuerza de su entorno físico.”

- Mecánica de rocas < geomecánica (incluye suelo) = ingeniería geotécnica
- Excavaciones mineras cambian los campos de fuerza de su entorno

Necesario para el Diseño



Diseño de Ingeniería de Rocas



σ_{roca} Campo de esfuerzos presente en el macizo rocoso

σ_v Campo de esfuerzos actuando sobre el pilar

S_p Resistencia del pilar

Factor de Seguridad del Diseño

$$f_s = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

- Factor mayor a 1
- La tendencia actual es calcular la confiabilidad del diseño

$$P(S_p \leq f\sigma_p)$$

Aproximación probabilística al diseño de minas

Cargas Sobre el Pilar

- Campo de esfuerzos en el macizo rocoso
 - Constitución del macizo rocoso, densidad
 - La profundidad del pilar minero
 - La tectónica
- Esfuerzos inducidos producidos por las excavaciones mineras

Resistencia del Pilar

- Parámetros Mecánicos
 - Módulo de elasticidad de la roca
 - Módulo de poisson
- Parámetros Constitutivos
 - Cohesión
 - Ángulo de fricción interna
- Condición estructural del macizo rocoso

Definiciones

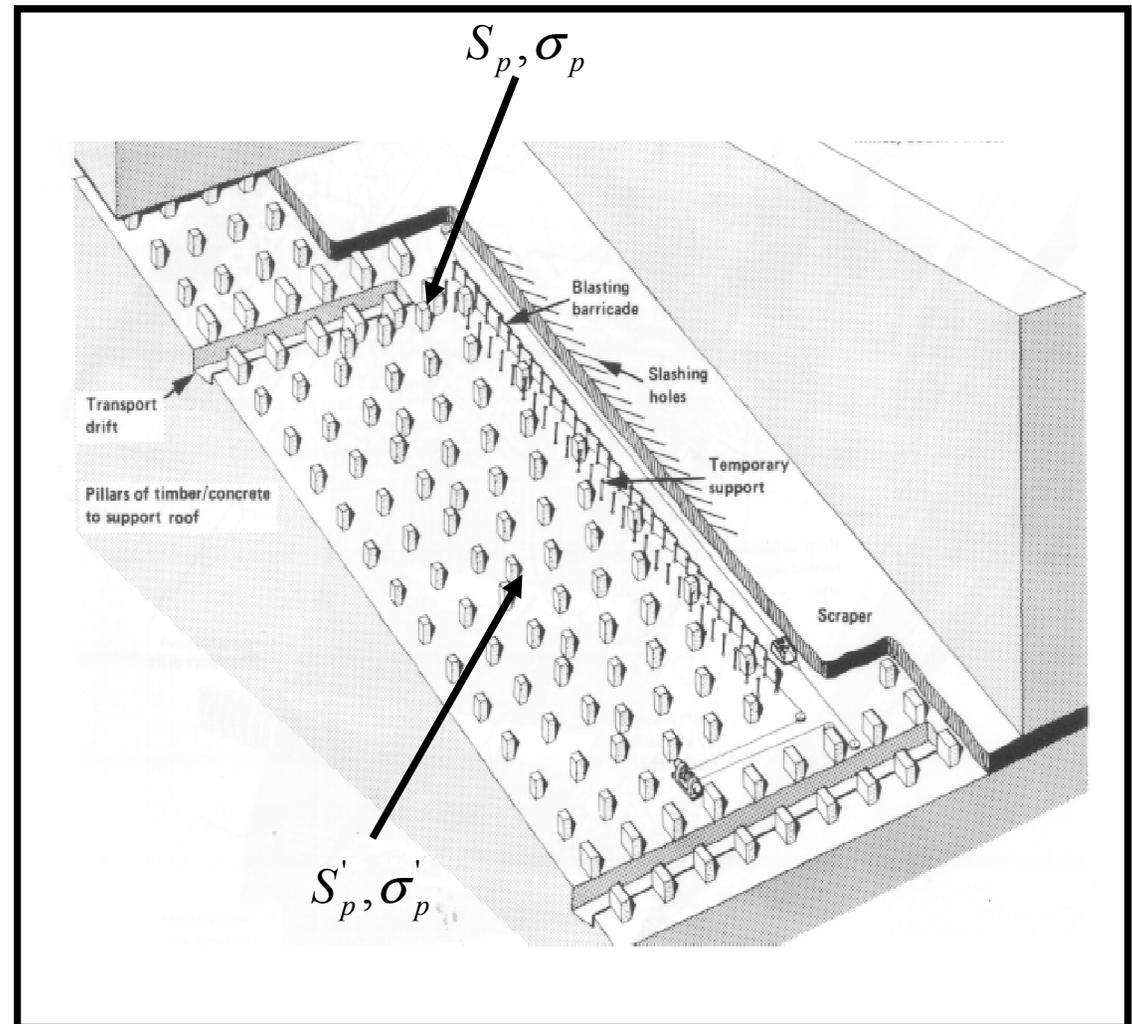
- La mecánica de rocas trata con un material previamente cargado. Al alterar la geometría del macizo rocoso (mediante una excavación en la roca), **se redistribuyen los esfuerzos** existentes.
- El macizo estaba en equilibrio y lo desestabilizamos.
- El principal problema de la mecánica de rocas es que **se desconocen estas cargas**. Es necesario, entonces, medir estos esfuerzos antes de iniciar la obra.
- Las **propiedades mecánicas de las rocas son desconocidas**. Hay que medirlas mediante **ensayos** de laboratorio o de terreno.
 - Sin embargo se requiere escalar sus resultados a macizo rocoso
- Pero la roca no es homogénea, por lo que es difícil de modelar.

Metodología para diseño

- Estimar el **campo de esfuerzo** y su distribución sobre el pilar a diseñar
- Determinar **propiedades de resistencia y deformación** del cuerpo mineralizado y de la roca huésped de manera reproducible y con cierto grado de exactitud
- Definir las **características estructurales** del macizo rocoso: localización, persistencia y propiedades mecánicas de discontinuidades, dentro de la zona de influencia de la actividad minera
- Establecer la distribución y magnitud de la **presión de agua** subterránea en el dominio
- Evaluar mediante técnicas analíticas los posibles **modos de respuesta** del macizo rocoso, para ciertas condiciones y geometría de las excavaciones mineras

Desafíos Relacionados con El Diseño Minero

- El esfuerzo sobre el pilar cambia de acuerdo a la secuencia de excavación
- La resistencia del pilar cambia de acuerdo a la secuencia de excavación
- El problema de diseño minero es dinámico, por lo tanto se debe resolver de manera iterativa



Clasificación Geológica de las rocas

- La idea es caracterizar ciertos parámetros de la roca que tiene que ver con su resistencia
- Estas características se pueden relacionar con las del macizo rocoso
- Desde el punto de vista genético:
 - Ígneas
 - Sedimentarias
 - Metamórficas
- Desde el punto de vista del comportamiento:
 - Textura cristalina
 - Textura clástica
 - Rocas de granos muy finos
 - Rocas orgánicas
- Comportamiento:
 - Elástico y frágil
 - Plástico
 - Viscoso
 - Isótropo o anisótropo

Clasificación Geológica de las rocas

- Descripción incluye:
 - Textura
 - Composición
 - Tipo de cementación en las discontinuidades
 - Diaclasamiento
 - Contenido de humedad
 - Poros
 - Etc.

Propiedades

- **Porosidad:** Indica la proporción entre la parte vacía de la roca (poros) y la parte sólida. Las porosidades normalmente fluctúan entre 0 y 40%.

$$n = \frac{V_P}{V_T} = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{volumen total}}$$

Porosities of Some Typical Rocks Showing Effects of Age and Depth^a

Rock	Age	Depth	Porosity (%)
Mount Simon sandstone	Cambrian	13,000 ft	0.7
Nugget sandstone (Utah)	Jurassic		1.9
Potsdam sandstone	Cambrian	Surface	11.0
Pottsville sandstone	Pennsylvanian		2.9
Berea sandstone	Mississippian	0-2000 ft	14.0
Keuper sandstone (England)	Triassic	Surface	22.0
Navajo sandstone	Jurassic	Surface	15.5
sandstone, Montana	Cretaceous	Surface	34.0
Beekmantown dolomite	Ordovician	10,500 ft	0.4
Black River limestone	Ordovician	Surface	0.46
Niagara dolomite	Silurian	Surface	2.9
limestone, Great Britain	Carboniferous	Surface	5.7
chalk, Great Britain	Cretaceous	Surface	28.8
Solenhofen limestone		Surface	4.8
Salem limestone	Mississippian	Surface	13.2
Bedford limestone	Mississippian	Surface	12.0
Bermuda limestone	Recent	Surface	43.0
Shale	Pre-Cambrian	Surface	1.6
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	1000 ft	17.0
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	3000 ft	7.0
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	5000 ft	4.0
Shale	Cretaceous	600 ft	33.5
Shale	Cretaceous	2500 ft	25.4
Shale	Cretaceous	3500 ft	21.1
Shale	Cretaceous	6100 ft	7.6
Mudstone, Japan	Upper Tertiary	Near surface	22-32
Granite, fresh		Surface	0 to 1
Granite, weathered			1-5
Decomposed granite (Saprolite)			20.0
Marble			0.3
Marble			1.1
Bedded tuff			40.0
Welded tuff			14.0
Cedar City tonalite			7.0
Frederick diabase			0.1
San Marcos gabbro			0.2

^a Data selected from Clark (1966) and Brace and Riley (1972).

Propiedades

- **Densidad:**

- Corresponde al peso por unidad de volumen
- Puede relacionarse con la mineralogía y constitución de los granos que forman la roca

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

- **Gravedad específica:**

- Es la densidad del material de interés dividida por la densidad del agua → medida adimensional
- Densidad del agua es 1 g/cm³, lo que hace que, cuando se mide en estas unidades (o equivalentemente en ton/m³), el valor de la densidad y gravedad específica sea el mismo.

$$G = \frac{\text{densidad del material}}{\text{densidad del agua}}$$

Propiedades

- Densidad:** Las gravedades específicas de minerales comunes fluctúan entre 2.0 (halita) y 7.0 (galena). Las rocas comunes tienen gravedades específicas entre 2.0 y 3.0 en la mayoría de los casos.

Material	Specific Gravity	Material	Specific Gravity
Andesite	2.5 - 2.8	Iron Ore	4.5 - 5.3
Basalt/Traprock	2.8 - 3.0	Lead Ore (Galena)	7.5
Coal - Anthracite	1.3	Limestone	2.3 - 2.7
Coal - Bituminous	1.1 - 1.4	Marble	2.4 - 2.7
Copper Ore	2	Mica, schist	2.5 - 2.9
Diabase	2.6 - 3.0	Quartzite	2.6 - 2.8
Diorite	2.8 - 3.0	Rhyolite	2.4 - 2.6
Dolomite	2.8 - 2.9	Rock Salt	2.5 - 2.6
Earth (dry)	1.6 - 1.8	Sandstone	2.2 - 2.8
Earth (wet)	2	Shale	2.4 - 2.8
Gneiss	2.6 - 2.9	Slate	2.7 - 2.8
Granite	2.6 - 2.7	Talc	2.6 - 2.8
Gypsum	2.3 - 2.8		

Propiedades

- **Permeabilidad:**
 - Mide de cierta forma la conexión existente entre poros, de modo que un fluido pueda movilizarse a través de la roca.
 - La permeabilidad k , se rige por la Ley de Darcy

$$q_x = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot A$$

donde:

- q_x es el flujo en la dirección x (L^3T^{-1})
- k es la permeabilidad (L^2)
- μ es la viscosidad ($FL^{-2}T$)
- p es la presión del fluido (FL^{-2})
- A es la sección del área normal a x (L^2)

Propiedades

- **Resistencia:**

- La resistencia mide la competencia de la roca.
- Se puede medir mediante el ensayo de carga puntual:

$$I_{S(50)} = \frac{P}{D^2}$$

- $I_{s(50)}$ es la resistencia a la carga puntual (rango típico va de 0.05 a 15 MPa)
- P es la carga al momento de la ruptura
- D es la distancia entre los puntos cargados
- En laboratorio, se hacen ensayos de compresión uniaxial, triaxiales, de tracción indirecta (brasileño), etc.

Propiedades

- Ensayo de compresión simple: Ruptura de probeta puede producirse por la matriz o por algún plano pre-existente de debilidad



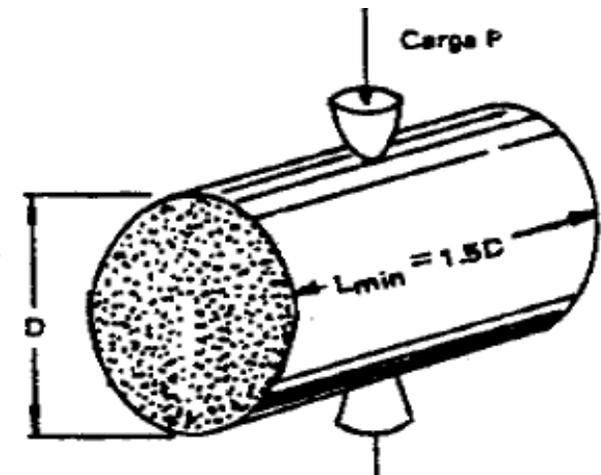
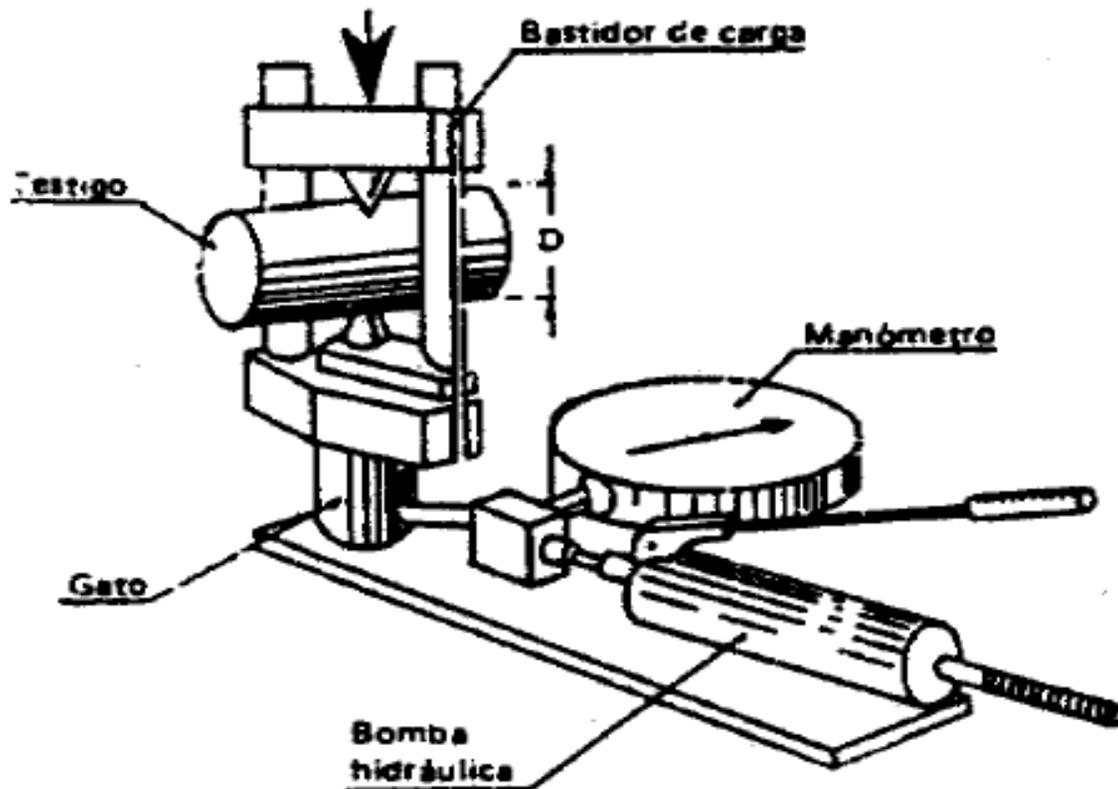
Propiedades

- Ensayo de compresión simple: Ruptura de probeta puede producirse por la matriz o por algún plano pre-existente de debilidad



Propiedades

- **Resistencia:** Ensayo de carga puntual



Propiedades

- **Resistencia:**
 - La resistencia a la carga puntual se correlaciona con la resistencia a la compresión no confinada o simple.
 - La siguiente ecuación es un resultado empírico entre la resistencia a la carga puntual y la resistencia a la compresión simple (no válida para rocas débiles).

$$\sigma_C = 24 I_{S(50)}$$

Propiedades

- Resistencia

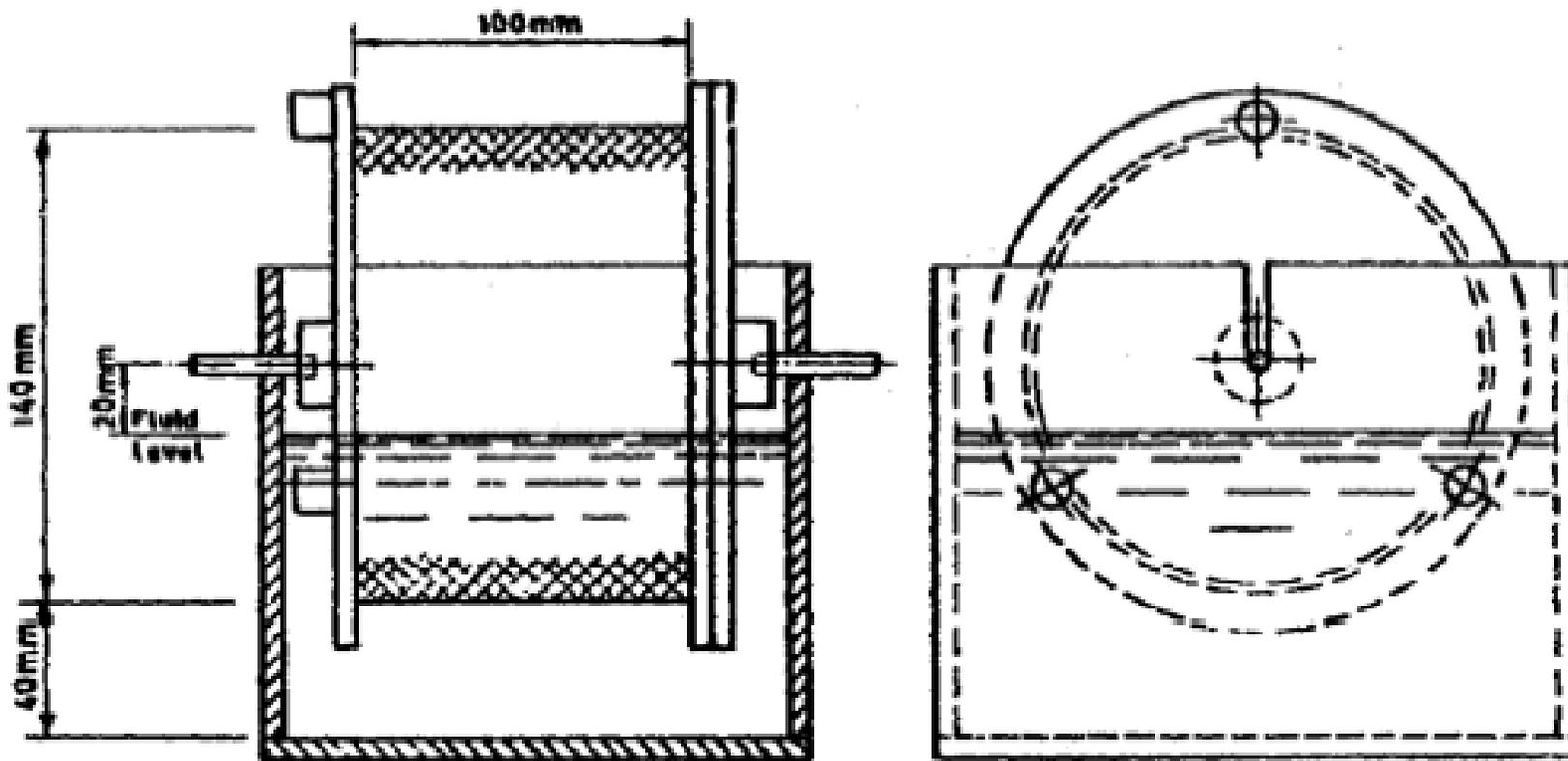
Term	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Schmidt Hardness (Type L - hammer)	Field Estimate of Strength	Examples*
R5 Extremely Strong	>250	>10	50-60	Rock material only chipped under repeated hammer blows	fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R4 Very Strong	100-250	4-10	40-50	Requires many blows of a geological hammer to break intact rock specimens	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble rhyolite, tuff
R3 Strong	50-100	2-4	30-40	Hand held specimens broken by a single blow of a geological hammer	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R2 Medium Strong	25-50	1-2	15-30	Firm blow with geological pick indents rock to 5mm, knife just scrapes surface	Claystone, coal, concrete, schist. shale, siltstone
R1 Weak	5-25	**	<15	Knife cuts material but too hard to shape into triaxial specimens	chalk, rocksalt, potash
R0 Very Weak	1-5	**		Material crumbles under firm blows of geological pick, can be scraped with knife	highly weathered or altered rock
Extremely Weak	0.25-1	**		Indented by thumbnail	clay gouge

Propiedades

- **Durabilidad:**
 - Mide la tendencia de los componentes de la roca a degradarse, al exponerse al aire, agua, tiempo, etc.
 - Es un concepto más aplicable a mecánica de suelos que a mecánica de rocas.
 - Se mide mediante un test:
 - Tambor de 140 mm de diámetro y 100 mm de largo
 - Paredes de un tamiz de 2 mm de apertura
 - 500 grs de roca en 10 piezas
 - El tambor gira a 20 rpm durante 10 minutos en un baño de agua
 - Se mide el porcentaje de roca retenida dentro del tambor

Propiedades

- Durabilidad



Relación roca intacta – macizo rocoso

- Las propiedades de la roca intacta no definen al macizo rocoso
→ discontinuidades
 - Inestabilidades pueden ser controladas por
 - Estructuras → gravedad
 - Esfuerzos → resistencia de la roca y esfuerzos a los que está sometida
- Es necesario escalar las propiedades de las rocas a las del macizo rocoso
 - **Métodos de clasificación**
 - Macizo es difícil de “medir” → escala
 - Se consideran los factores que influyen en el comportamiento a escala de macizo rocoso



Relación roca intacta – macizo rocoso

- Parámetros que influyen en el comportamiento del macizo rocoso:
 - Resistencia de la roca intacta
 - Estructuras presentes
 - Frecuencia
 - Relleno
 - Resistencia del relleno
 - Orientación
 - Características geológicas de la roca:
 - Origen
 - Estructura (grado de alteración)
 - Presencia de agua
 - Dirección / tamaño / vida útil de la excavación
- Se puede definir refuerzo en función de la calidad del macizo rocoso

Relación roca intacta – macizo rocoso

- Ejemplo: RMR

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality <i>RQD</i>		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		

Relación roca intacta – macizo rocoso

B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)

Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Class number	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

D. MEANING OF ROCK CLASSES

Class number	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Friction angle of rock mass (deg)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
Ratings	6	5	3	1	0

F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**

Strike perpendicular to tunnel axis		Strike parallel to tunnel axis	
Drive with dip - Dip 45 - 90°	Drive with dip - Dip 20 - 45°	Dip 45 - 90°	Dip 20 - 45°
Very favourable	Favourable	Very unfavourable	Fair
Drive against dip - Dip 45-90°	Drive against dip - Dip 20-45°	Dip 0-20 - Irrespective of strike°	
Fair	Unfavourable	Fair	

Relación roca intacta – macizo rocoso

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock <i>RMR</i> : 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock <i>RMR</i> : 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock <i>RMR</i> : 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock <i>RMR</i> : 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V – Very poor rock <i>RMR</i> : < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

Selección de método de explotación

Definición

- **Método de explotación:**

Es la estrategia global que permite la excavación y extracción de un cuerpo mineralizado del modo técnico y económico más eficiente

- Define los principios generales según los que se ejecutan las operaciones unitarias
- Define criterios con respecto al tratamiento de las cavidades que deja la extracción

Clasificación de métodos

- Una primera clasificación de los métodos se refiere a si la explotación se realiza siempre expuesta a la superficie o si se desarrolla a través de labores subterráneas.
 - Métodos de explotación **a cielo abierto**
 - Métodos de explotación **subterránea**

Explotación de superficie

- Cielo abierto, rajo abierto o tajo abierto (Open Pit). Es el método que más se ve en Chile, particularmente en la explotación de yacimientos de metales básicos y preciosos.
- Cantera (Quarry). Este nombre se da a la explotación de mineral que puede utilizarse directamente en aplicaciones industriales, como es el caso de la sílice, caliza y piedra de construcción.
- Lavaderos o placeres. Corresponde a la explotación de depósitos de arena en antiguos lechos de ríos o playas, con el fin de recuperar oro, piedras preciosas u otros elementos químicos valiosos.
- Otros:
 - Disolución, corresponde a la extracción de azufre o sales solubles mediante la incorporación de un solvente y posterior extracción del soluto de la solución recuperada.
 - Minería costa afuera, para la extracción de nódulos de manganeso presentes en el fondo del océano.

Explotación subterránea

- Métodos autosoportantes o de caserones abiertos: Dejan la cavidad que el mineral ocupaba vacía → caserón estable en forma natural o escasos elementos de refuerzo.
 - Room and Pillar
 - Stope and Pillar
 - Shrinkage Stopping
 - Sublevel Stopping
 - Vertical Crater Retreat

Explotación subterránea

- Métodos soportados o de caserones que requieren elementos de soporte para mantenerse estables y/o que se rellenan con algún material exógeno.
 - Cut and Fill Stopping
 - Excavation Techniques
 - Backfilling Methods

Explotación subterránea

- Métodos de hundimiento: las cavidades generadas por el mineral extraído son rellenas con el material superpuesto (mineral, mientras dura la explotación, y estéril, una vez finalizada). El hundimiento y consecuente relleno de las cavidades se produce simultáneamente a la extracción del mineral.
 - Longwall Mining
 - Sublevel Caving
 - Block / Panel Caving

Criterios de selección

- **Características Espaciales:** tamaño, forma, disposición, profundidad
 - Rajo vs Subterránea
 - Afectan tasa de producción, método de manejo de material, diseño de la mina en el depósito.
- **Condiciones Geológicas e Hidrológicas:** drenaje, mineralogía y petrografía, composición química, estructuras, planos de debilidad, uniformidad, aguas subterráneas e hidrología
 - Tanto de mineral como de roca de caja (o huésped)
 - Afecta la decisión de usar métodos selectivos o no selectivos

Criterios de selección

- **Consideraciones Geotécnicas:** propiedades elásticas, comportamiento plástico o viscoelástico, estado de los esfuerzos, consolidación, compactación, competencia, otras propiedades físicas
 - Selección del método (soporte necesario)
 - Hundibilidad
- **Consideraciones Económicas:** reservas, tasa de producción, vida de la mina, productividad, costo de mina de métodos posibles de aplicar
 - Determinan el éxito del proyecto
 - Afectan inversión, flujos de caja, periodo de retorno, beneficio

Criterios de selección

- **Factores Tecnológicos:** porcentaje de recuperación, dilución, flexibilidad a cambios en la interpretación o condiciones, selectividad, concentración o dispersión de frentes de trabajo, capital, mano de obra, mecanización
 - Se busca la mejor combinación entre las condiciones naturales y el método
- **Factores Medioambientales:** control de excavaciones para mantener integridad de las mismas, subsidencia y efectos en superficie, control atmosférico, fuerza laboral
 - No sólo físico, sino que también económico-político-social