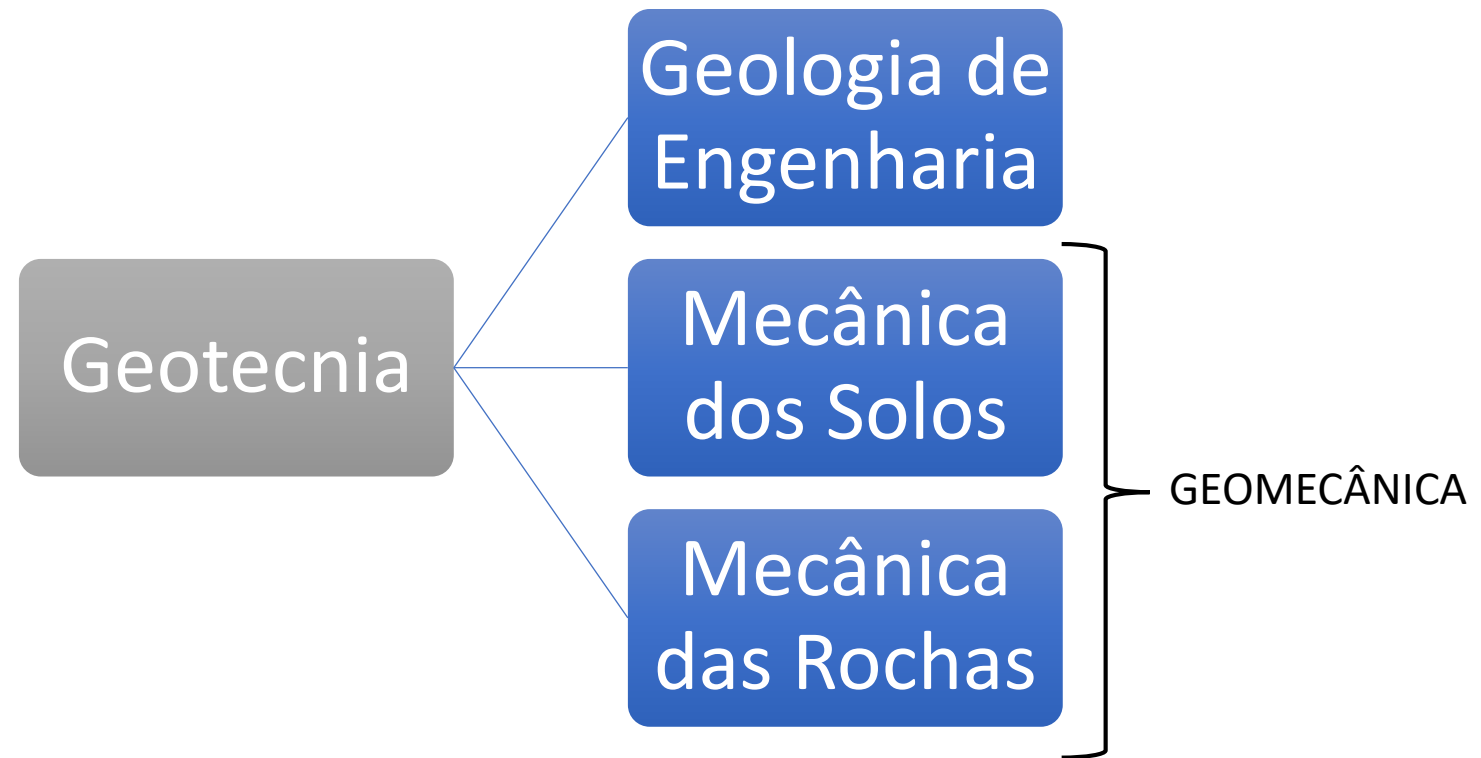


# Mecânica de rochas

Propriedades das rochas e dos maciços rochosos

- Introdução – conceitos
  - Rochas x solos
  - Maciço rochoso
- Propriedades físicas e mecânicas da rocha intacta
- Descontinuidades
  - Tipos
  - Propriedades
  - Permeabilidade e pressão hidráulica
- Propriedades do Maciço rochoso
- Classificações geomecânicas

# Posicionamento disciplinar








# Solos x Rochas: Propriedades geotécnicas

Material	Resistência	Módulo de elasticidade	Escavação
Solos	kPa	MPa	Lâmina de aço
Rochas	MPa	GPa	Escarificador/explosivo

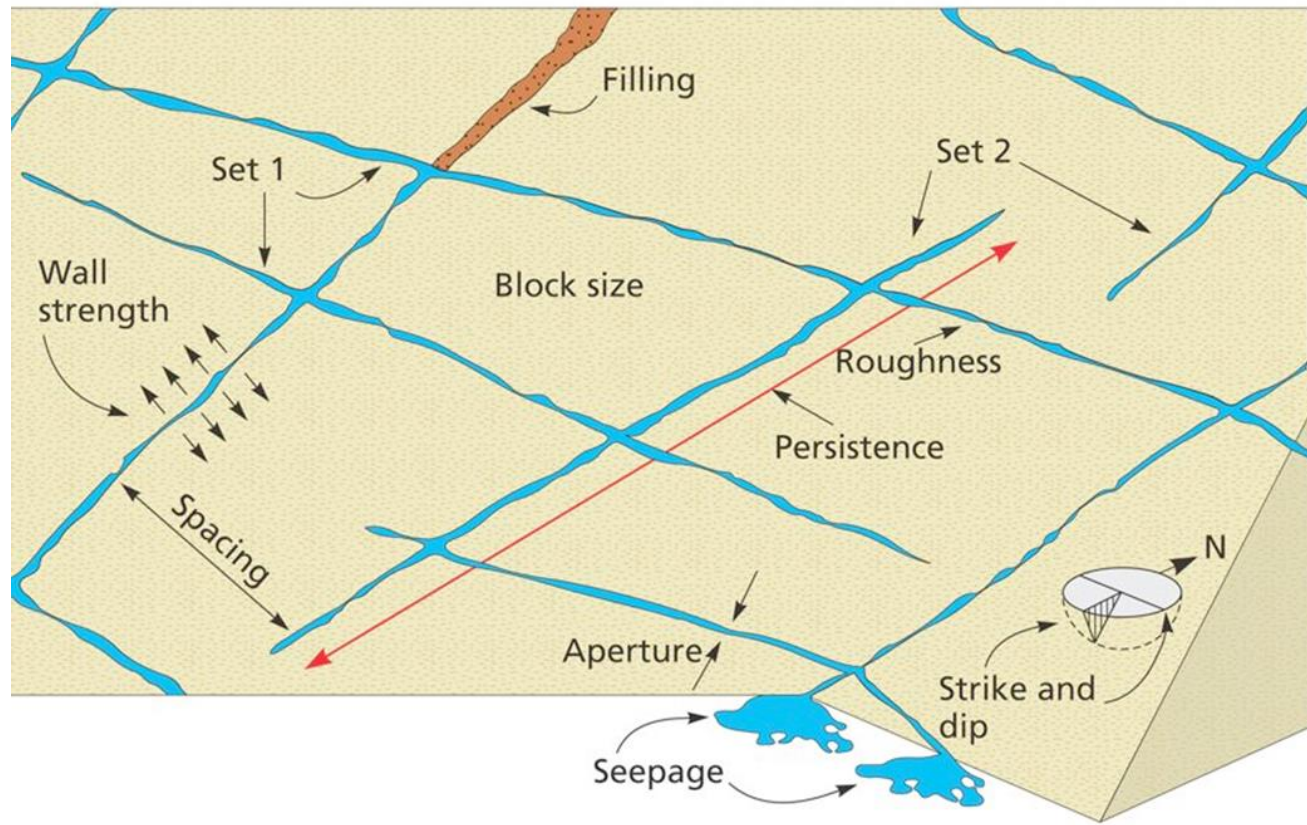
Resistência à compressão simples (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Exemplos
< 1	Solos			
1-5	Muito branda	Branda > 1,25	Muito baixa	Sal, marga, lamito, carvão.
5-12,5	Branda	Moderadamente branda		
12,5-25		Moderadamente Dura		
25-50	Moderadamente dura		Baixa	Folhelho.
50-100	Dura	Dura	Média	xisto, arenito, calcário.
100-200	Muito dura	Muito dura	Alta	Granitos, gnaisses, arenitos cimentados.
> 200		Extremamente dura	Muito alta	Quartzito, gabro, basalto
> 250	Extremamente dura			

# PERFIL DE ALTERAÇÃO

Vaz (1996)

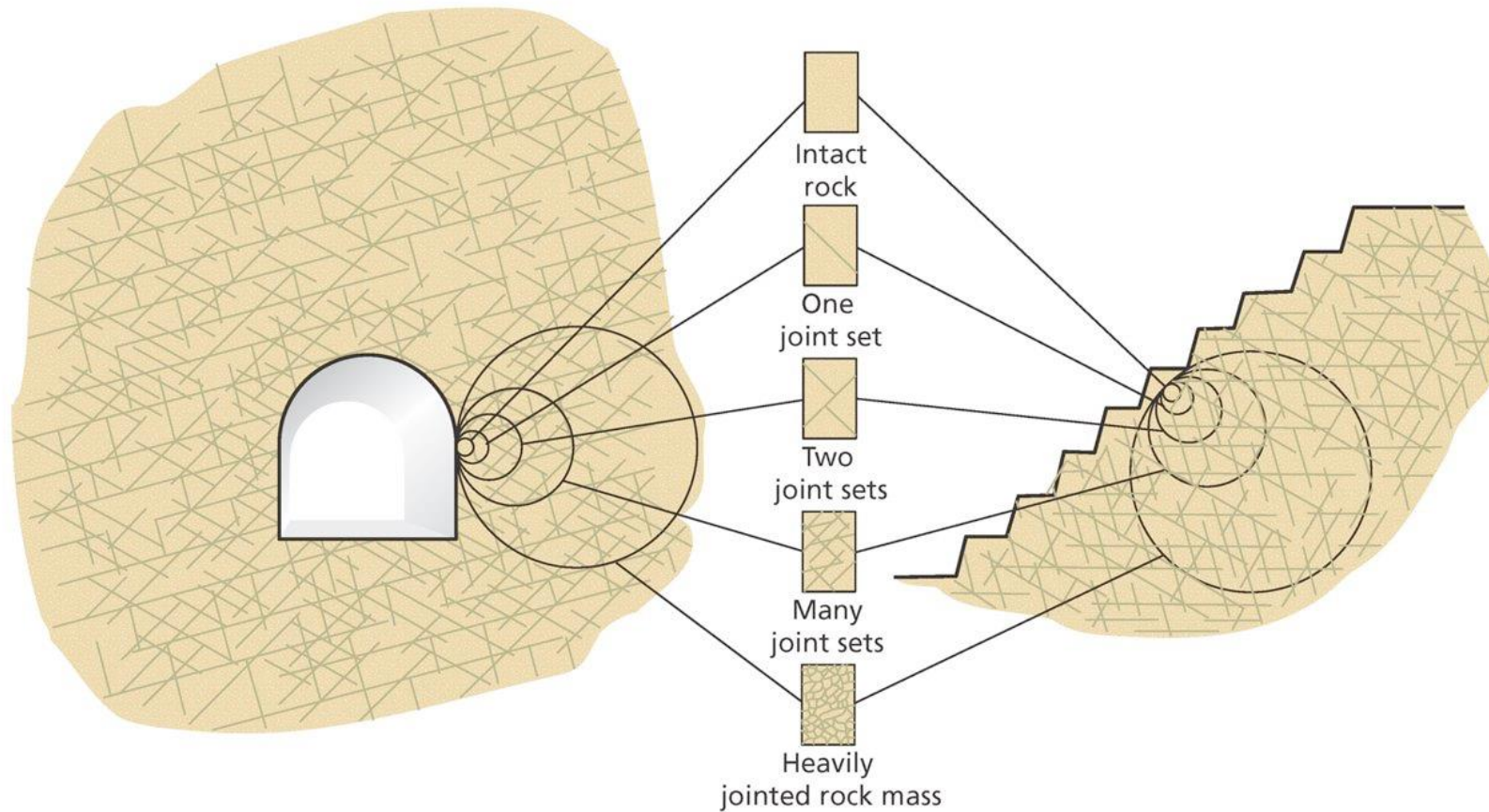
CLASSIFICAÇÃO	CLASS	IMTEMPERISMO	PROCESSOS	COMPORTAMENTO		
				ESCAVAÇÃO	PERFURAÇÃO	
SOLO RESIDUAL	Solo Vegetal		PEDOLÓGICO	LÂMINA DE AÇO ("SCRAPER", ENXADÃO, FACA) 1ª	HOMOGENEO ISOTRÓPICO	
	S1					À PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM
ROCHA	Solo de Alteração (SA) saprólito		INTEMPÉRICOS QUÍMICOS	ESCARIFICADOR (PICARETA) 2ª	DEPENDENTE DO TIPO DE ROCHA	
	R3					À PERCUSSÃO COM LAVAGEM
	R2					
R1		PIENTES USANTES				
	Rocha Sã					

# Maciço Rochoso



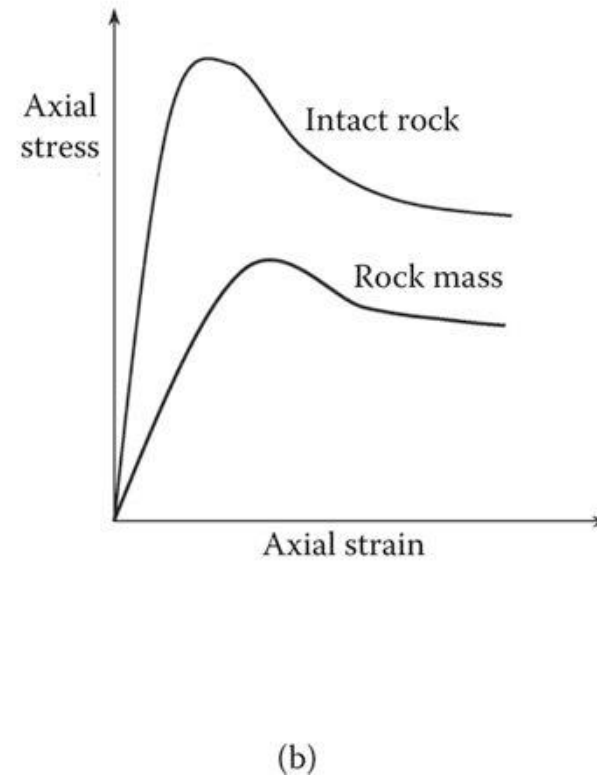
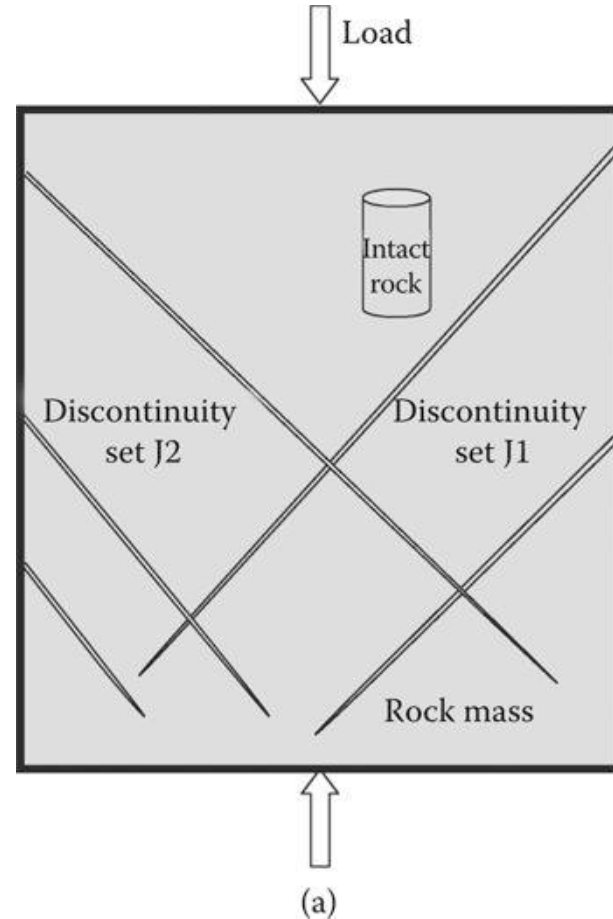
- Maciço rochoso é um conjunto de blocos de rocha, justapostos e articulados formado por:
- Matriz rochosa ou rocha intacta
- Descontinuidades
- Água

# Maciço rochoso - Influencia da escala





# Resistência: matriz rochosa x maciço



## PROPRIEDADES DA **MATRIZ ROCHOSA**

	Propriedades	Métodos de determinação
<b>Propriedades de identificação e classificação</b>	Composição mineralógica Estrutura e textura Granulometria Cor	Descrição visual Microscopia ótica e eletrônica Difração de raios X
	Porosidade	Ensaio de laboratório
	Peso específico	
	Umidade	
	Permeabilidade	Ensaio de permeabilidade
	Durabilidade Alterabilidade	Ensaio de alterabilidade
<b>Propriedades mecânicas</b>	Resistência à compressão simples	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de carga pontual Martelo de Schmidt
	Resistência à tração	Ensaio de tração
	Velocidades de ondas sísmicas	Ensaio de medida de velocidade em laboratório
	Resistência ao cisalhamento	Ensaio de compressão triaxial Ensaio de cisalhamento direto
	Deformabilidade	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de velocidade sônica

# Descrição (litologia x tipo litológico)

- Basalto:
  - Compacto
  - Vesicular
  - Brecha
- Arenito:
  - Silicificado = rocha resistente
  - Não silicificado = rocha branda/inconsolidado
- Gnaisse:
  - Estrutura/fraturamento/grau de alteração

# TIPOS DE BASALTOS

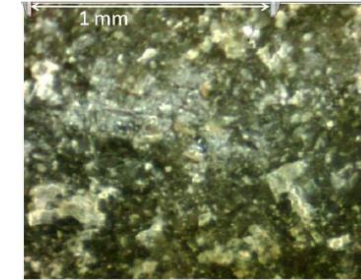
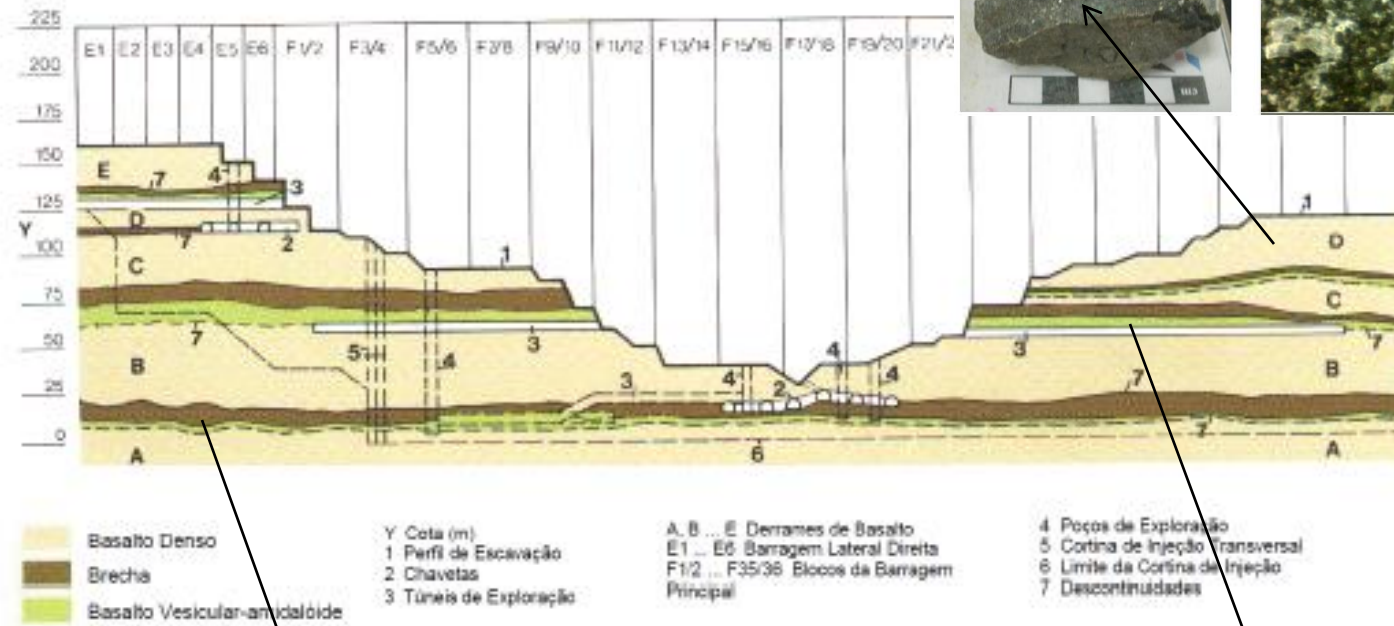


Figura 3.4 – Seção geológica longitudinal ao eixo da barragem principal de Itaipu (Fonte: ITAIPU, 1994).



Tabela 2.3 (continuação) – Valores de parâmetros geotécnicos de rocha basáltica.

Descrição	Presença de argilominerais	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\alpha_a$ (%)	$\eta_a$ (%)	$\sigma_c$ (MPa)	$I_{S(50)}$ (MPa)	$I_M$ (%)	Local	Referência
Denso cinza escuro	Esmectita - alteração de clinopiroxênios	2,9	0,4	1,1	190,7	-	3,3	Brasil (São Paulo)	Gomes (2001)
Basalto Vesicular	Esmectita - alteração de clinopiroxênios	2,2	7,8	17,3	60	-	12,9	Brasil (São Paulo)	Gomes (2001)
Denso cinza escuro	--	2,91	0,23	0,68	198,83	11,6	-	Brasil (São Paulo)	Freitas Neto et al. (2006)
Denso cinza escuro	Produto de alteração	-	1,25	-	237,8	8,98	-	Brasil (São Paulo/ Minas Gerais)	Maia (2001)
Denso cinza escuro são	-	2,81	-	0,32	-	5,6	-	Nova Zelândia	Moon e Jayawardane (2004)
Denso cinza escuro levemente alterado	-	2,12	-	7,96	-	0,41	-	Nova Zelândia	Moon e Jayawardane (2004)
Denso escuro	-	2,56	3,53	6,35	40,64	-	-	Turquia	Gurocak e Kilic (2005)
Denso são	-	2,96	-	0,11	172,6	15,15	-	India	Gupta e Rao (1998)
Denso levemente alterado	-	2,59	-	1,97	93,2	6,23	-	India	Gupta e Rao (1998)
Geral	-	2,50 a 2,85	-	-	38,3 a 173,7	0,54 a 6,79	-	India	Birid (2006)
Brecha vulcânica	-	2,29 a 2,51	-	-	1,8 a 94,6	0,33 a 3,44	-	India	Birid (2006)

**Legenda**

$\rho_d$ : Densidade aparente seca (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta_a$ : Porosidade aparente (%)

$\alpha_a$ : Absorção-d'água (%)

$\sigma_c$ : Resistência à compressão uniaxial (MPa)

$I_{S(50)}$ : Índice de compressão pontual (MPa)

$I_M$ : índice de perda de massa por ciclagem água/estufa (%)

## GRAU DE ALTERAÇÃO

Graus de alteração seg. IPT (1984) / ISRM (1981)

Sigla	Denominação	Características da rocha
A1/W1 (RS)	Rocha sã ou praticamente sã.	Apresenta minerais primários de vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2/W2 (RAD)	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3/W3 (RAM)	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4/W4 (REA)	Rocha extremamente alterada (saproilito)	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

# Mineralogia

- Alterabilidade (presença de argilas expansivas)
- Presença de materiais deletérios (reações álcali-agregados)
- Presença de materiais nocivos ao concreto (sulfetos, pulverulentos)
- Abrasividade (dureza)



# Alterabilidade (alteração com o tempo)

**Testemunhos após retirada (arenitos e siltitos)**



**Testemunhas após 6 meses (alteração dos siltitos)**





# *Alterabilidade*

**Amostras recém retiradas**



**Após 6 meses**



# Determinação da alterabilidade

- Ciclos de saturação em solução de sulfeto de sódio ou magnésio e secagem em estufa (NBR 7702)
- Ciclos de saturação em água e secagem em estufa (NBR 12696)
- Saturação em etilenoglicol (NBR 12697)
- Slake durability test (ISRM)
- Exposição às condições climáticas naturais – ciclagem natural (NBR 12695)

# Ensaio de alterabilidade – slake durability test



$$Id = \frac{M_f}{M_i} \times 100$$

Mf = massa final  
Mi = massa inicial

Tempo: 10 min (Id<sub>1</sub>)  
20 min (Id<sub>2</sub>)

Id <sub>2</sub> (%)	Categorias
< 30	Muito baixa
30 – 60	Baixa
60 – 85	Média
85 – 95	Média-alta
95 – 98	Alta
> 98	Muito alta

# Ensaio de ciclagem natural em grande escala (Basalto de Itaipu)





# Basalto de Itaipu

**Após 1 ano**



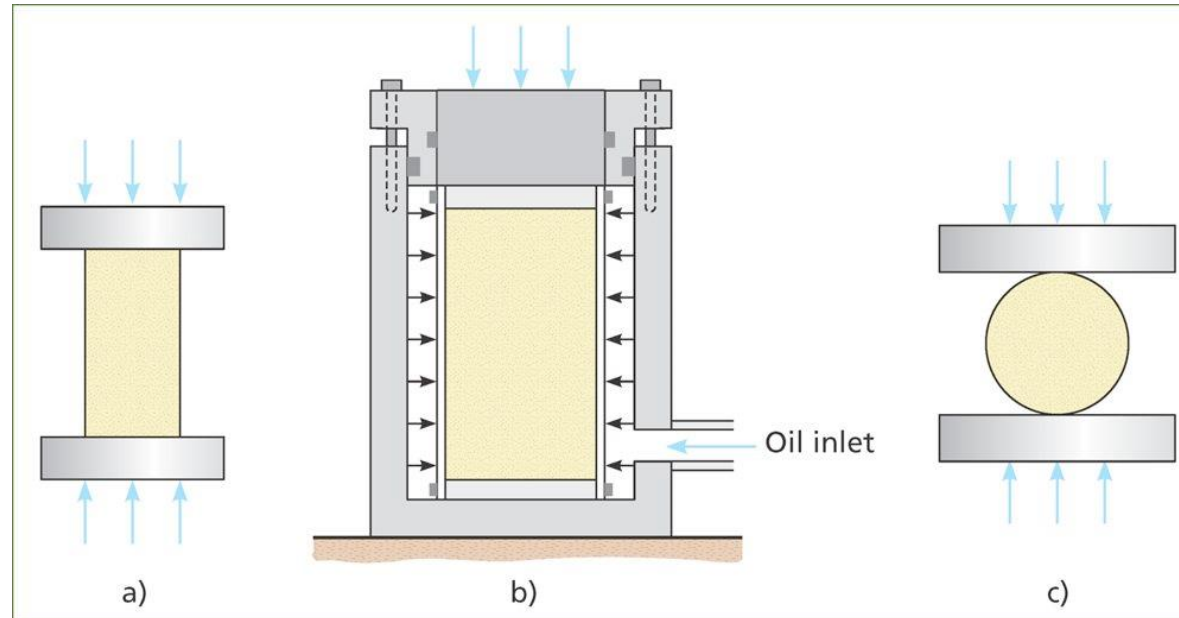
**Após 6 anos**



# Propriedades mecânicas da rocha intacta

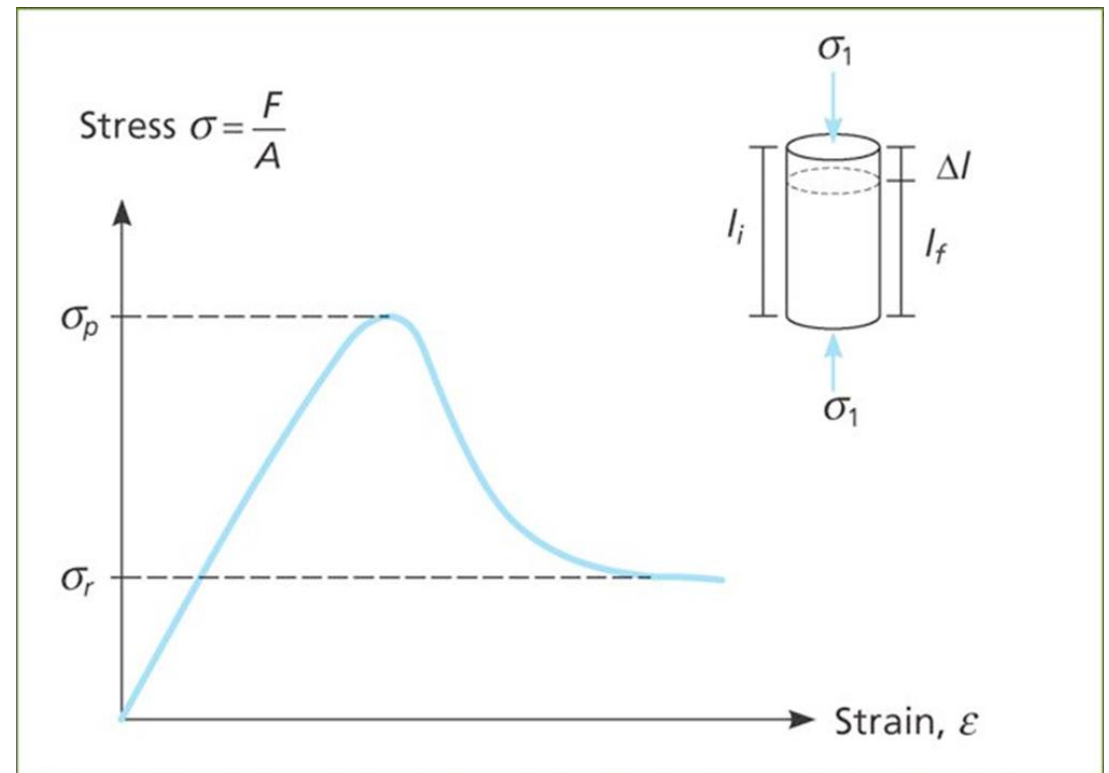
- Resistência á compressão simples
- Resistência à tração
- Velocidade das ondas sísmicas ( $V_p$ ,  $V_s$ )
- Resistência ao cisalhamento ( $C$ ,  $\phi$ )
- Deformabilidade (módulos de deformação elástico/dinâmicos –  $E$ ,  $\nu$ )

# Ensaio de resistência



- a) UNIAXIAL
- b) TRIAXIAL
- c) TRAÇÃO INDIRETA OU BRASILEIRO

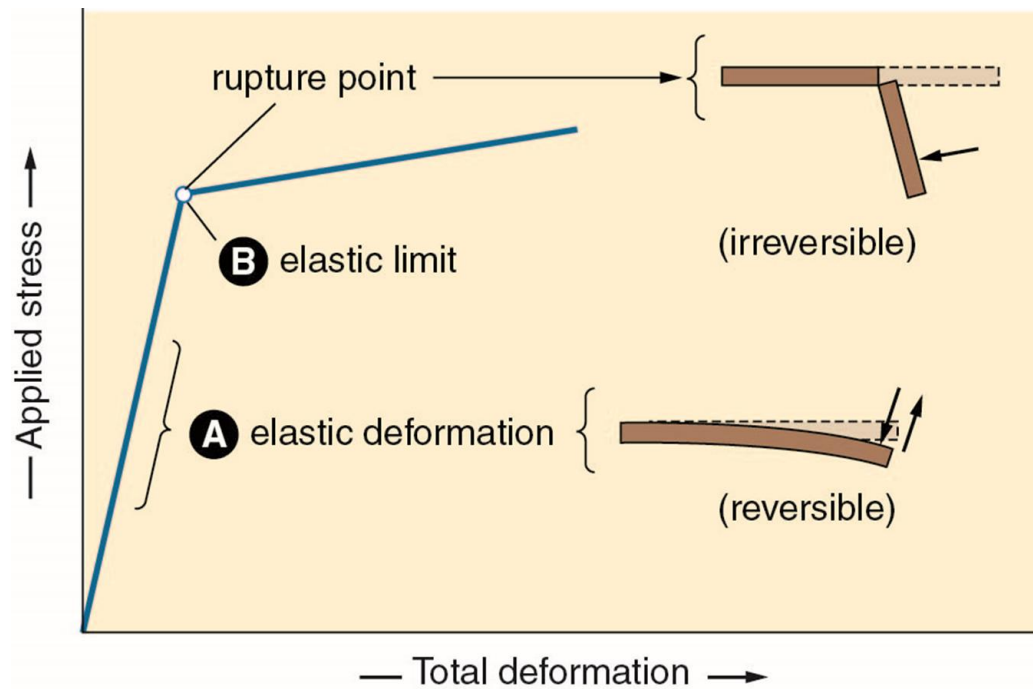
# Resistência à compressão simples (uniaxial)



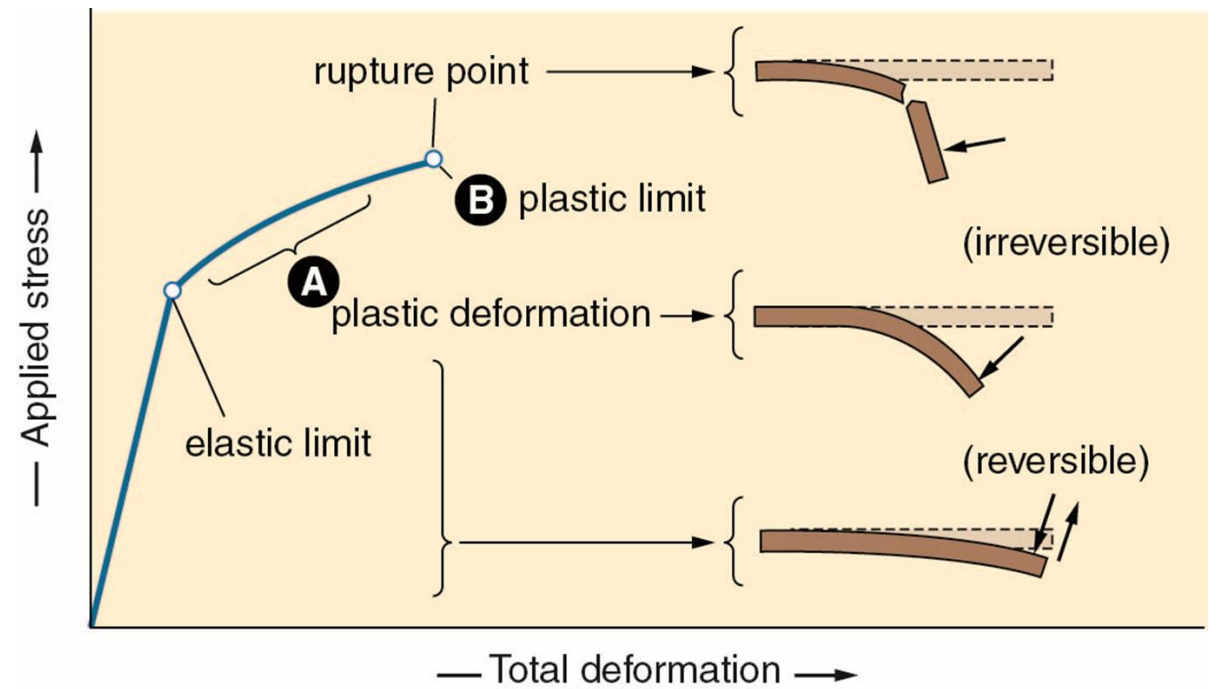


# Curva tensão x deformação:

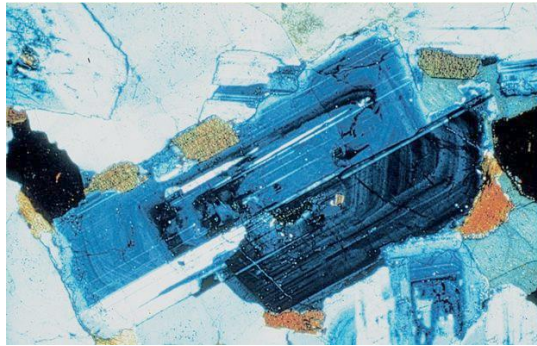
## Elástico



## Elástico – plástico



# CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO – COMPORTAMENTO DAS ROCHAS



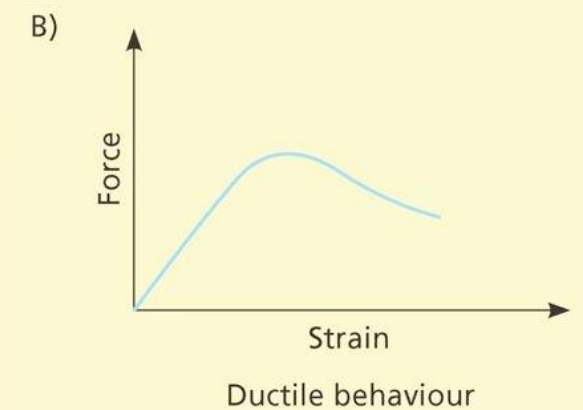
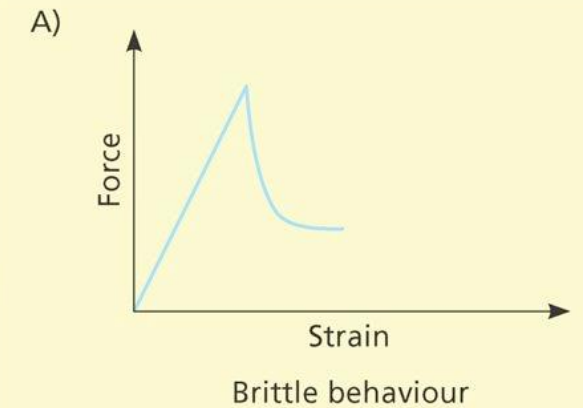
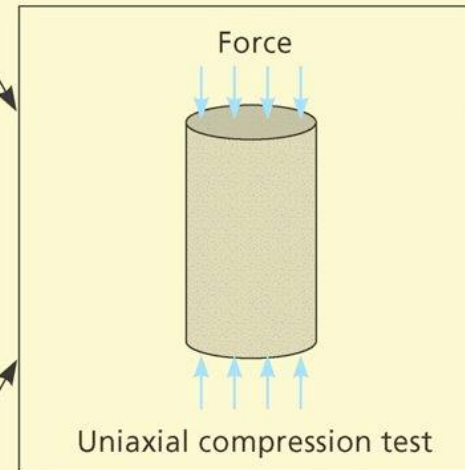
## Granite (Photo A)

- Intrusive acid igneous rock.
- Interconnected coarse-grained crystals with no preferred orientation.
- Composition: quartz, feldspar, micas and mafic minerals.



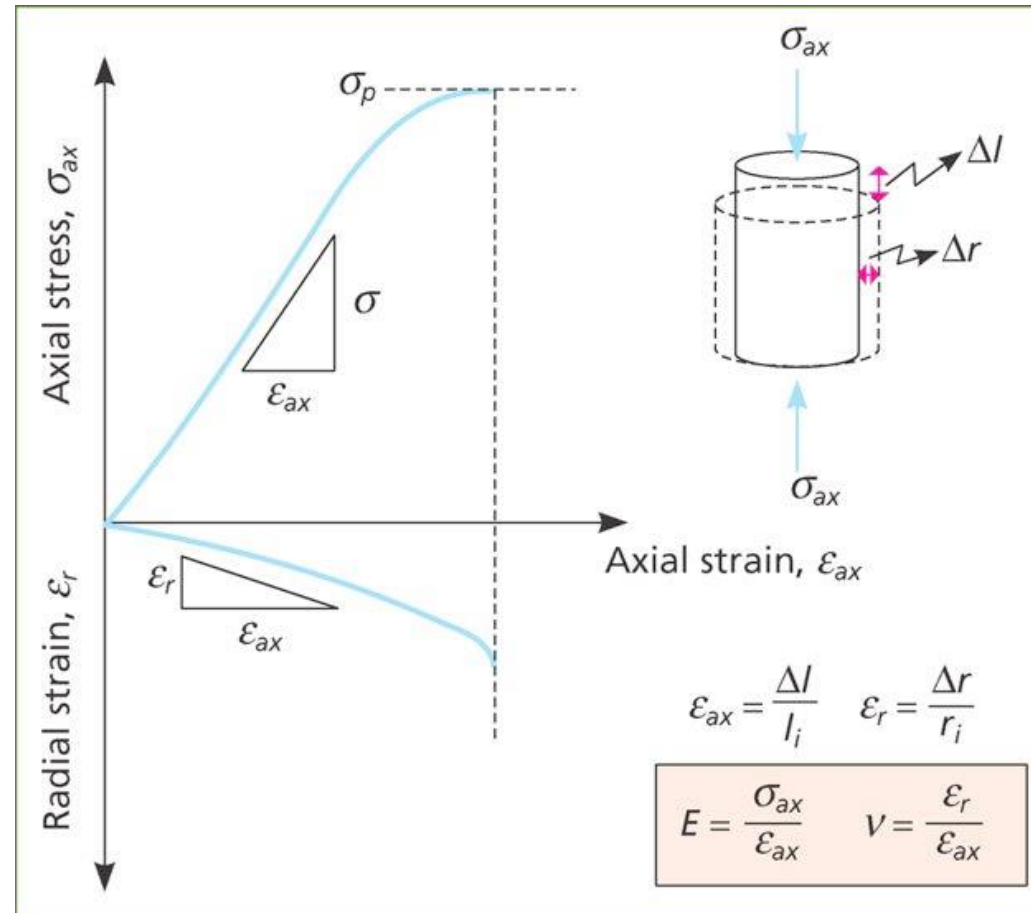
## Mudstone (Photo B)

- Clayey clastic sedimentary rock.
- Fine grains with banding and parallel orientation of minerals.
- Composition: clayey minerals (mainly illite and kaolinite), quartz and other minerals.



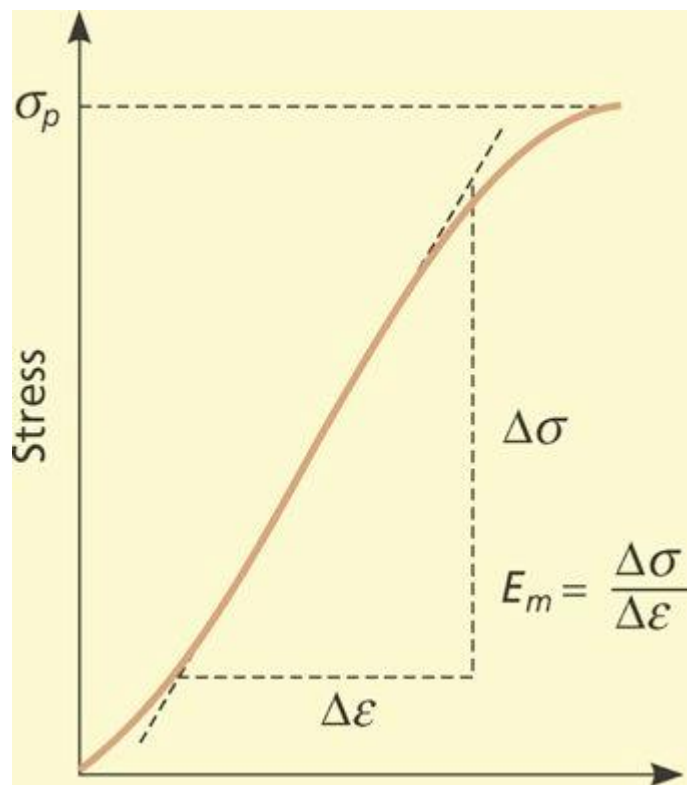
Módulo de elasticidade ou Módulo de Young (E)

Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )

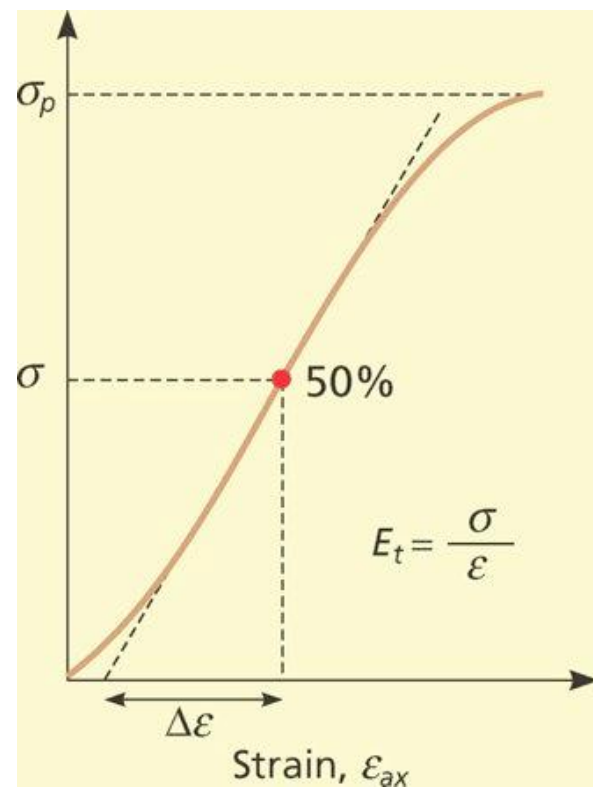


# Cálculo do Módulo de elasticidade

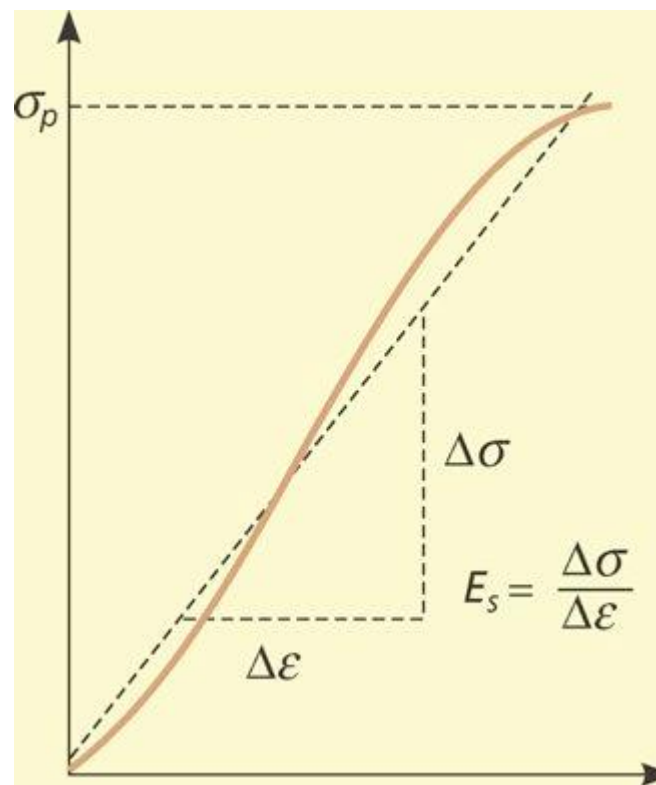
## Módulo médio ( $E_m$ )



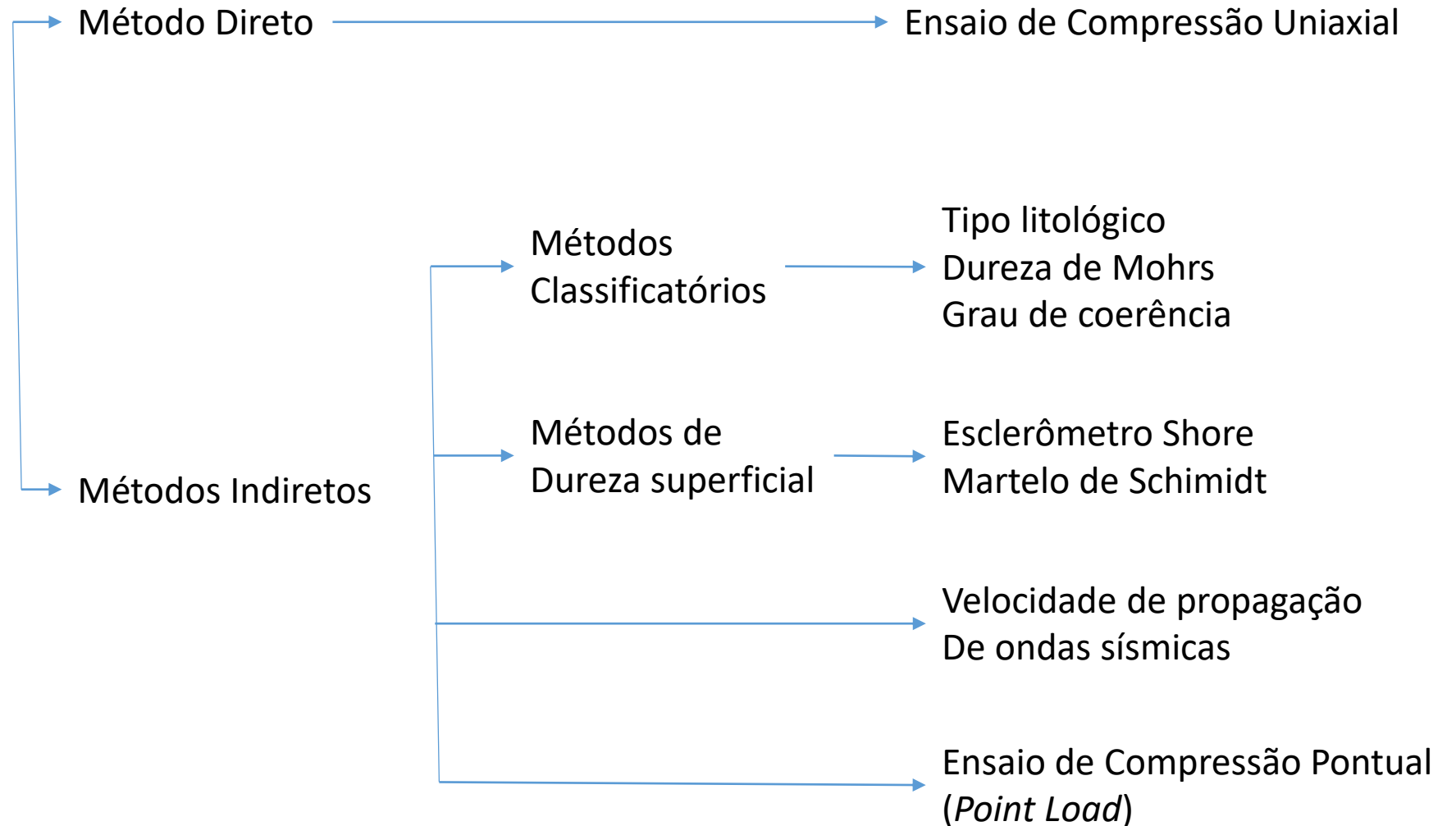
## Módulo tangente ( $E_t$ )



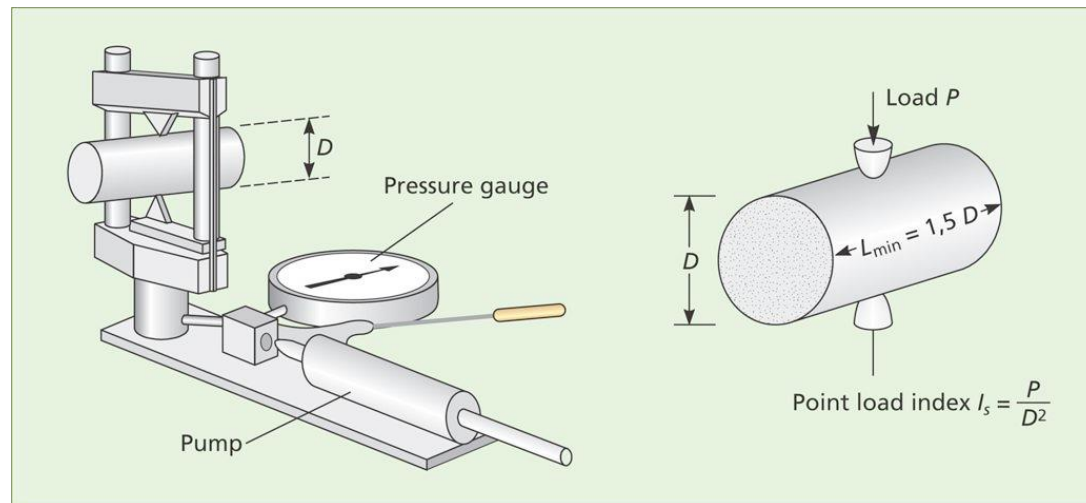
## Módulo secante ( $E_s$ )



Métodos para determinação da Resistência à compressão Simples



# Resistência uniaxial – ensaio de carga pontual





## ENSAIO DE COMPRESSÃO PONTUAL (POINT LOAD TEST)



Resistência à Compressão Uniaxial

$$\sigma_c = k I_{s(50)}$$

com:

$$I_s = P/D^2$$

Onde:

$\sigma_c$  = resistência à compressão uniaxial

$I_{s(50)}$  = índice de resistência à compressão pontual (normalizado para  $D = 50$  mm)

$k$  = fator de ajuste (20-25)

$P$  = carga (N)

$D$  = diâmetro (m)



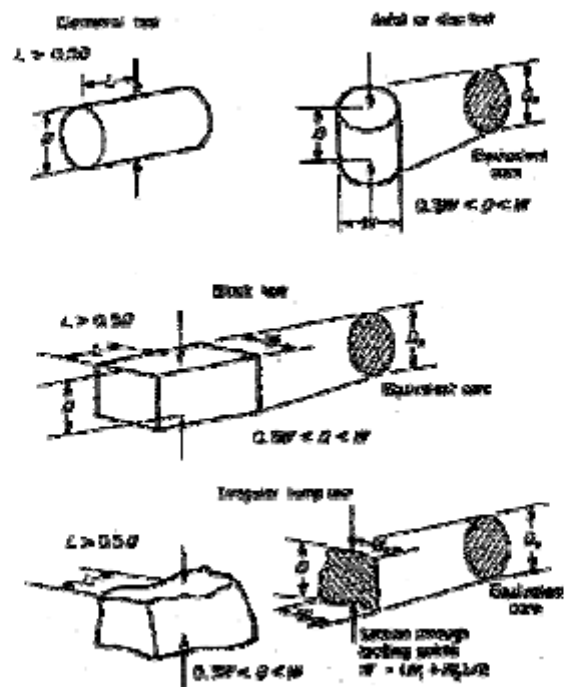
ENSAIO DE COMPRESSÃO PONTUAL (POINT LOAD TEST)



Ensaio com o Point Load Test



## ENSAIO DE COMPRESSÃO PONTUAL (POINT LOAD TEST)

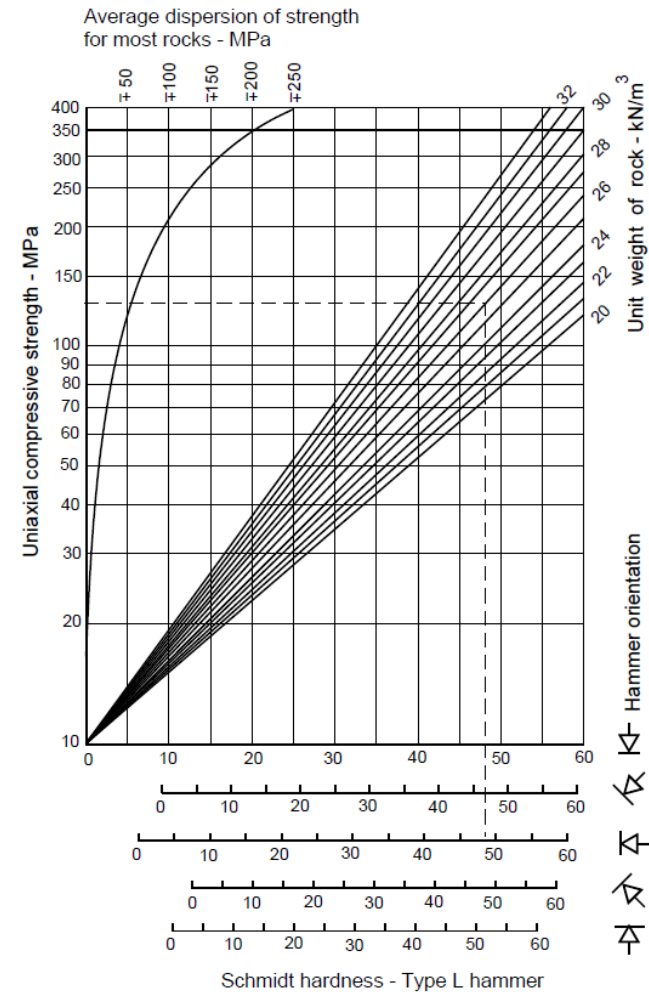


Tipos de Amostras para Ensaios de Compressão Pontual

### PROCEDIMENTO PARA AMOSTRAS DE FORMATO IRREGULAR

1. Determinação da área da face de ruptura: .....A (mm<sup>2</sup>)
2. Cálculo do diâmetro equivalente:..... $D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$  (mm)
3. Cálculo do fator de correção de tamanho: ..... $F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45}$  ou  $F = \sqrt{\frac{D_e}{50}}$  para  $D_e \approx 50$  mm
4. Cálculo do índice do "Point Load Test": ..... $I_p = \frac{P}{D_e^2} \left( \frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right)$
5. Cálculo do índice do "Point Load Test" corrigido: ..... $i_{p(50)} = F \cdot I_p$  (MPa)
6. Cálculo da resistência à compressão uniaxial: .... $\sigma_c = k \cdot i_{p(50)}$  (MPa)  
(onde k = 20 - 25)

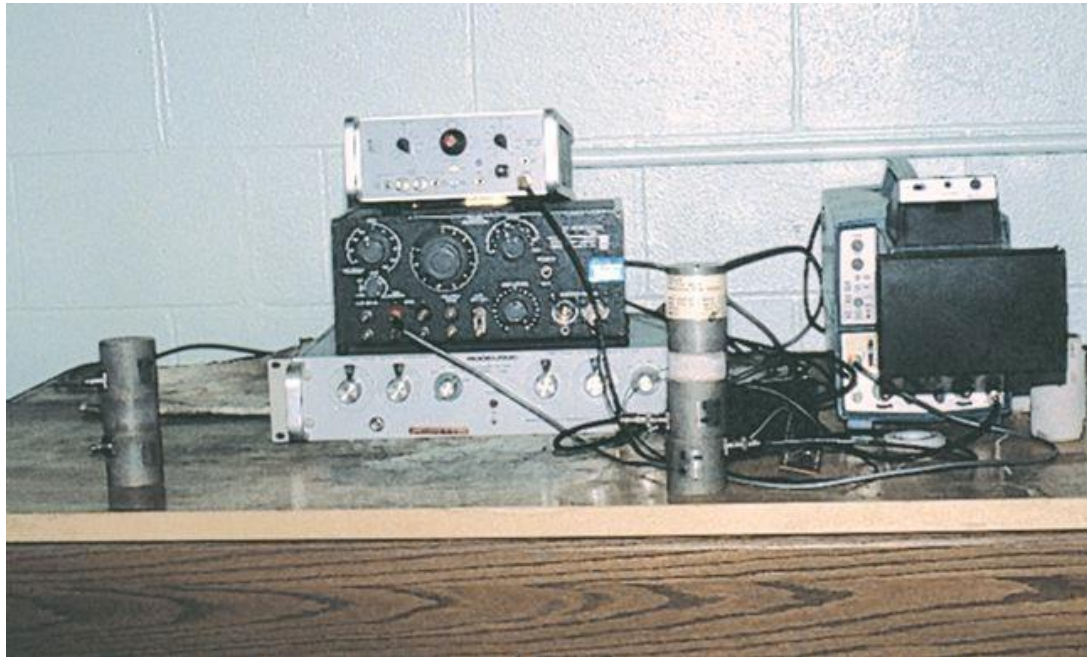
# Esclerômetro ou Martelo de Schmidt



# Resistência - determinação indireta

Grau	Descrição	Identificação de campo	Campo aproximado de variação da resistência a compressão uniaxial (MPa)
R <sub>0</sub>	Extremamente fraca	Marcada pela unha	0,25 – 1,0
R <sub>1</sub>	Muito fraca	Esmigalha-se sob o impacto da ponta do martelo de geólogo, pode ser raspada por canivete	1,0 – 5,0
R <sub>2</sub>	Fraca	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por firme pancada com a ponta do martelo de geólogo	5,0 – 25
R <sub>3</sub>	Medianamente resistente	Não pode ser raspada por canivete, amostras podem ser fraturadas com um único golpe do martelo de geólogo	25 – 50
R <sub>4</sub>	Resistente	Amostras requerem mais de um golpe de martelo para fraturarem-se	50 – 100
R <sub>5</sub>	Muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturarem-se	100 – 250
R <sub>6</sub>	Extremamente resistente	Amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo	250

# Velocidade de propagação de ondas



Obtenção do módulo de deformação dinâmico:

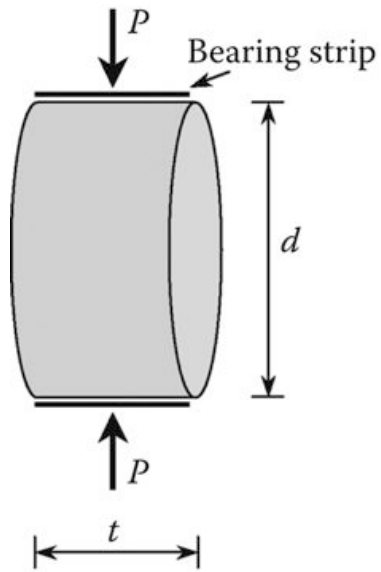
$$E_d = V_p^2 \rho [(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)/(1 - \nu_d)]$$
$$\nu_d = 1/2[(V_p/V_s)^2 - 2]/[(V_p/V_s)^2 - 1]$$

# Resistência à tração: método direto

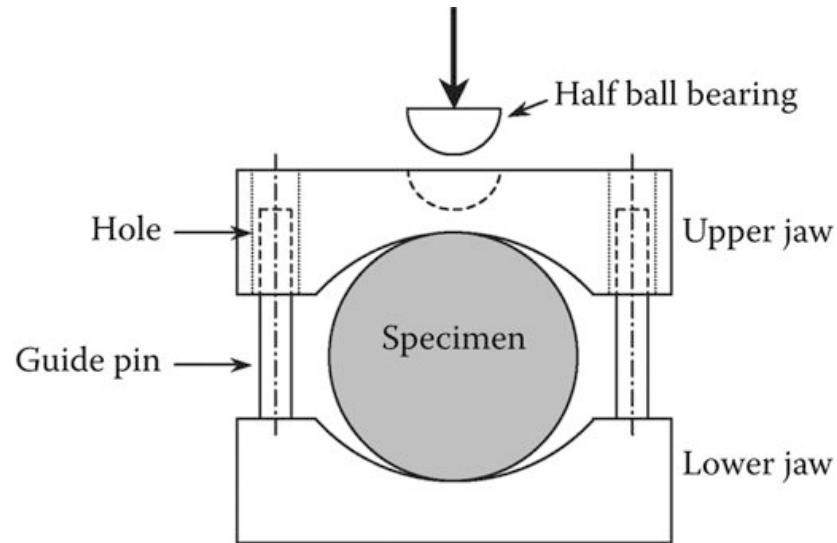




# Resistências à tração: método indireto ou brasileiro.

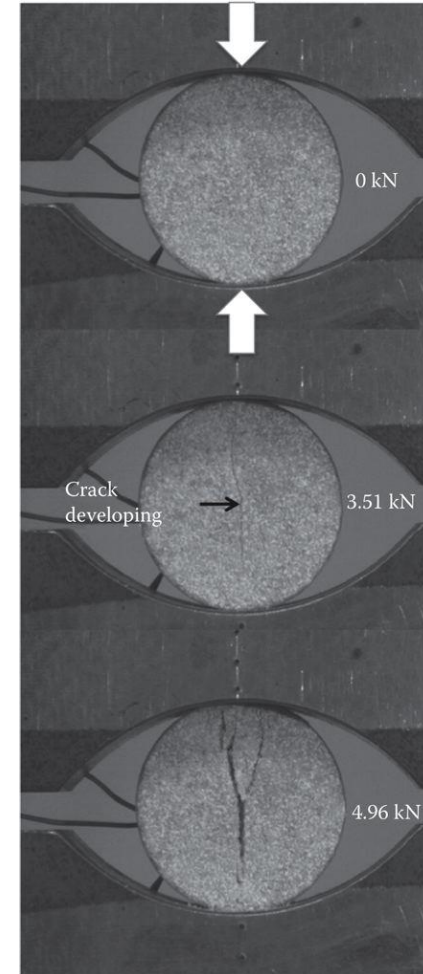


(a)



(b)

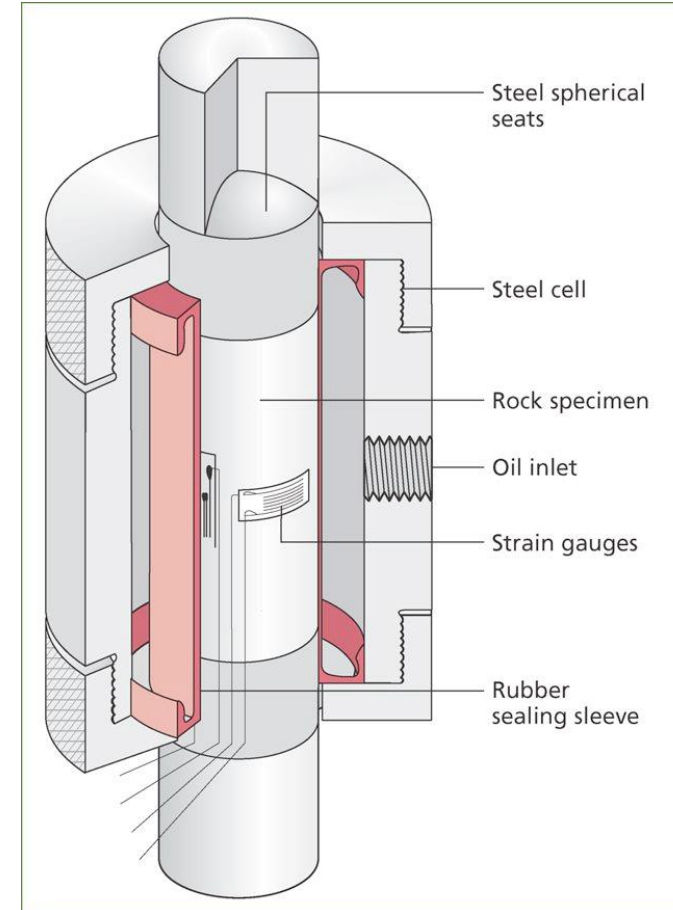
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt}$$



# Ensaio de tração: Adaptação para utilizar o Point Load

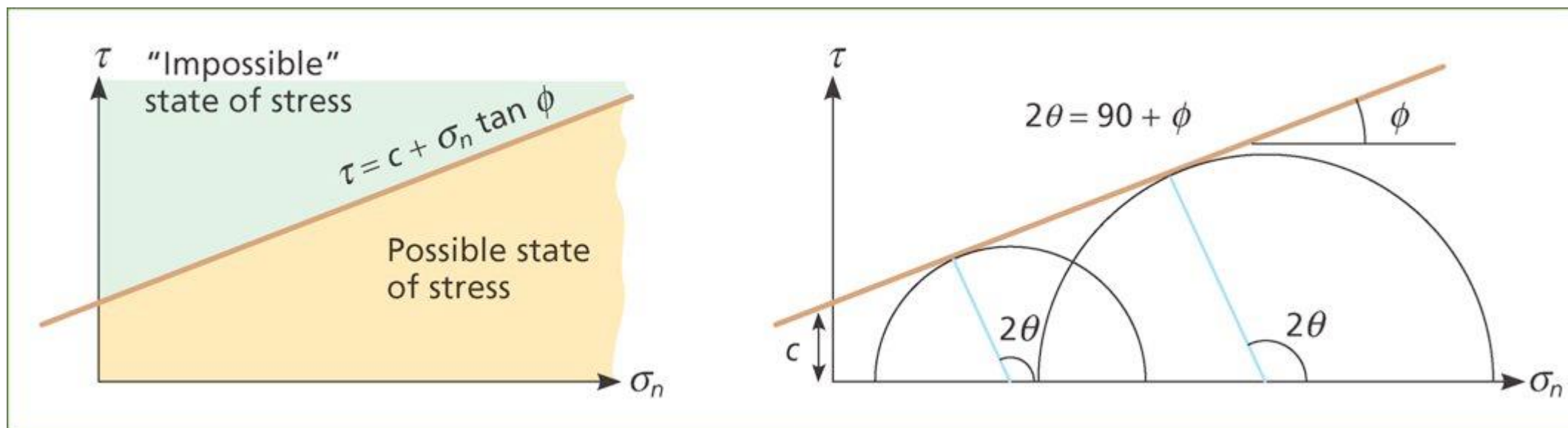


# Resistência ao cisalhamento - Ensaios triaxiais

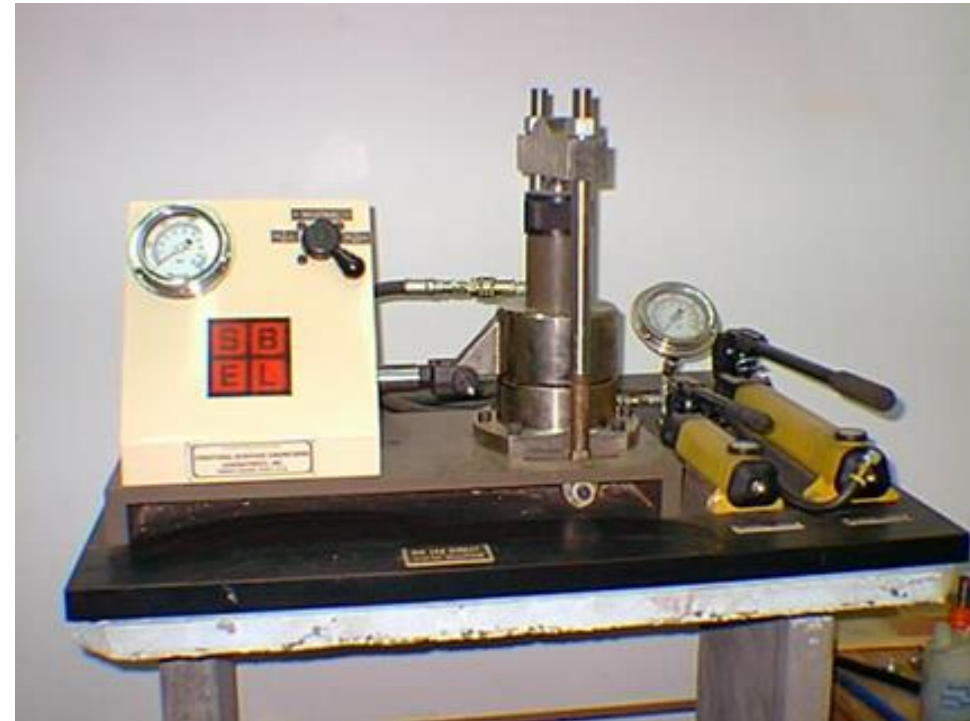
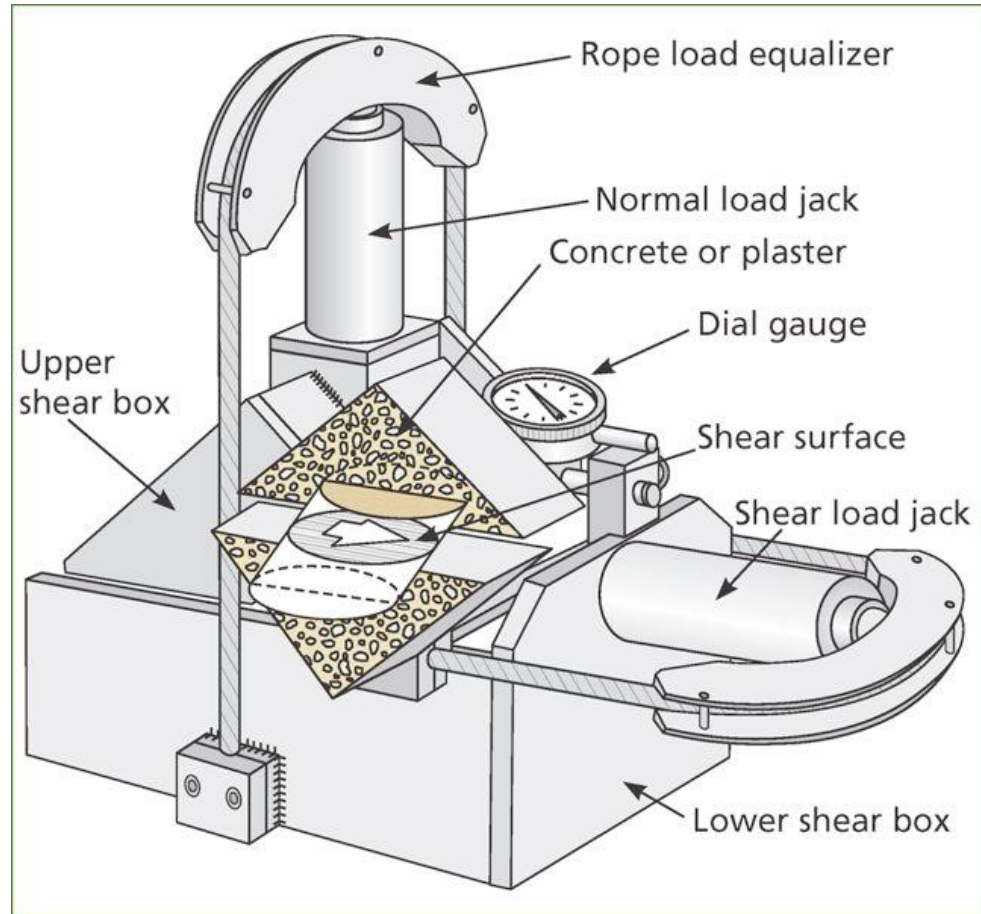


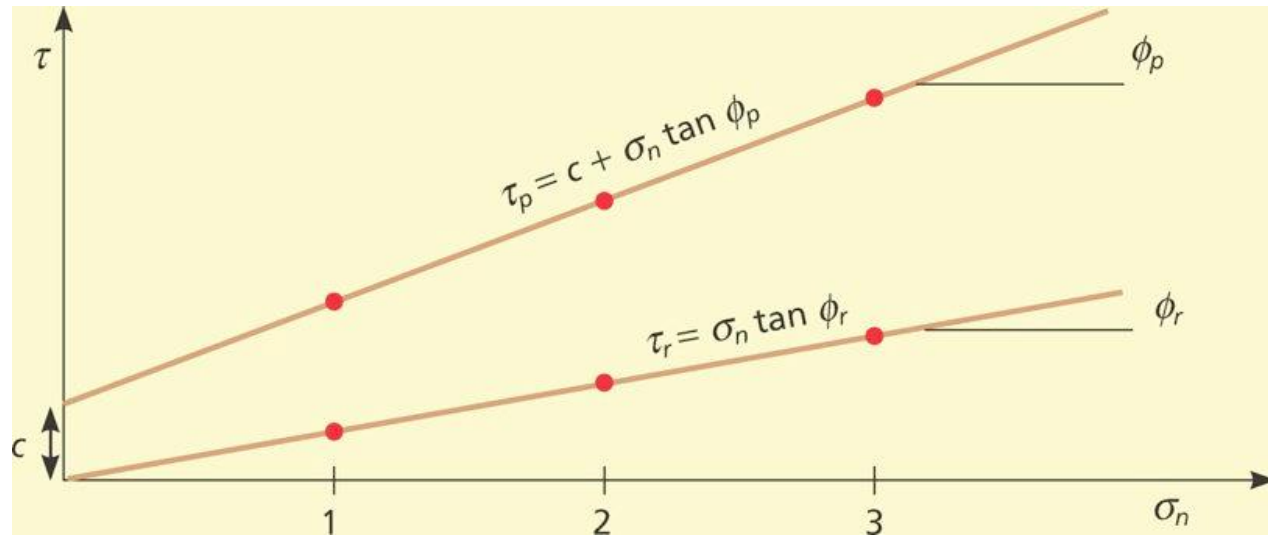
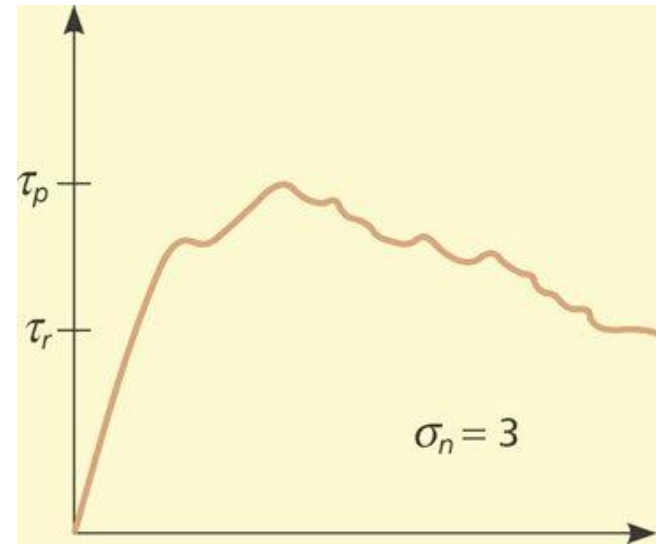
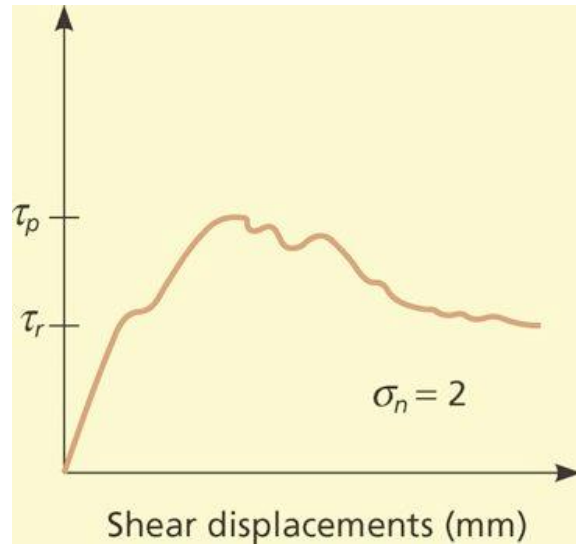
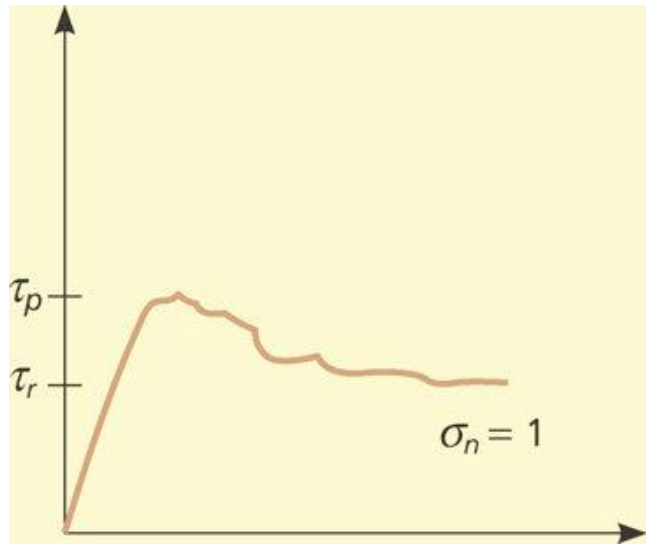


# Ensaaios triaxiais (critério de Mohr-Coulomb)



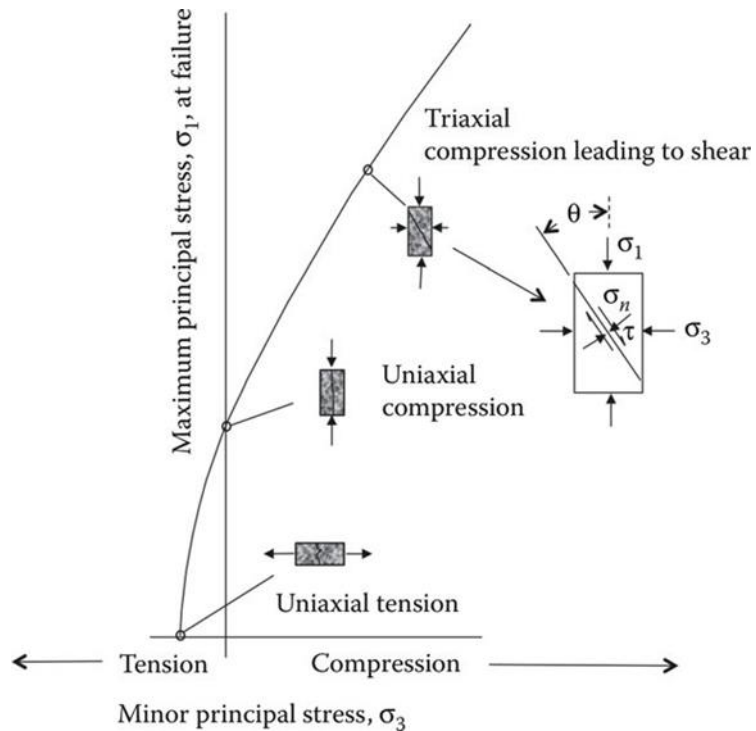
# Ensaio de cisalhamento direto



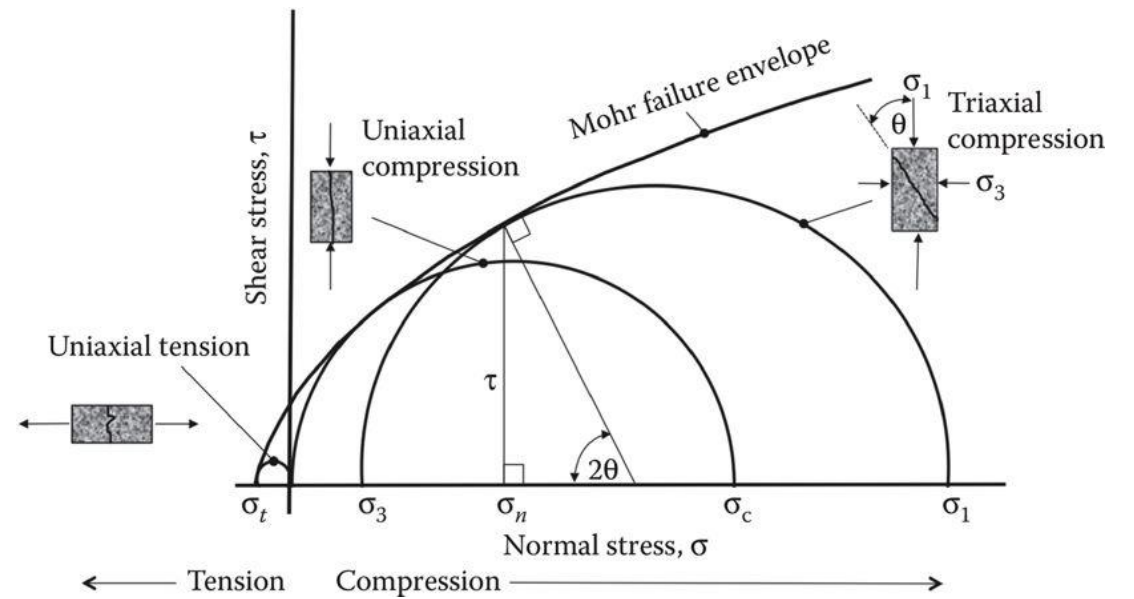


# Ensaio de Tração, Compressão Uniaxial e compressão Triaxial

## Curva $\sigma_1 \times \sigma_3$



## Curva $\tau \times \sigma_n$

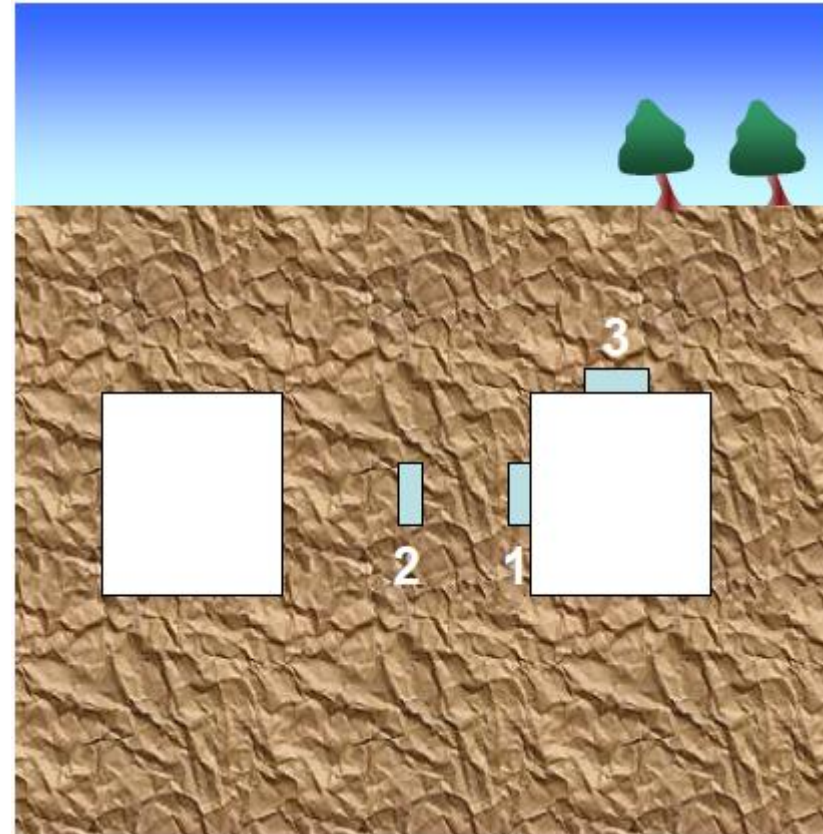


Estado de tensões  
próximos à escavações

1 – UNIAXIAL STRESS

2 – TRIAXIAL STRESS

3 - TRAÇÃO

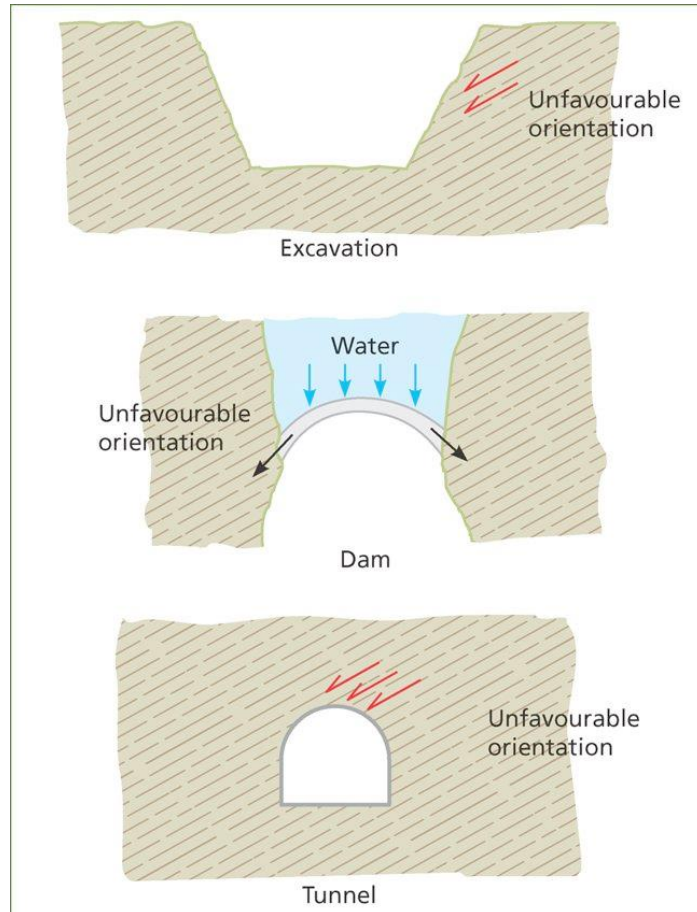


# Descontinuidades

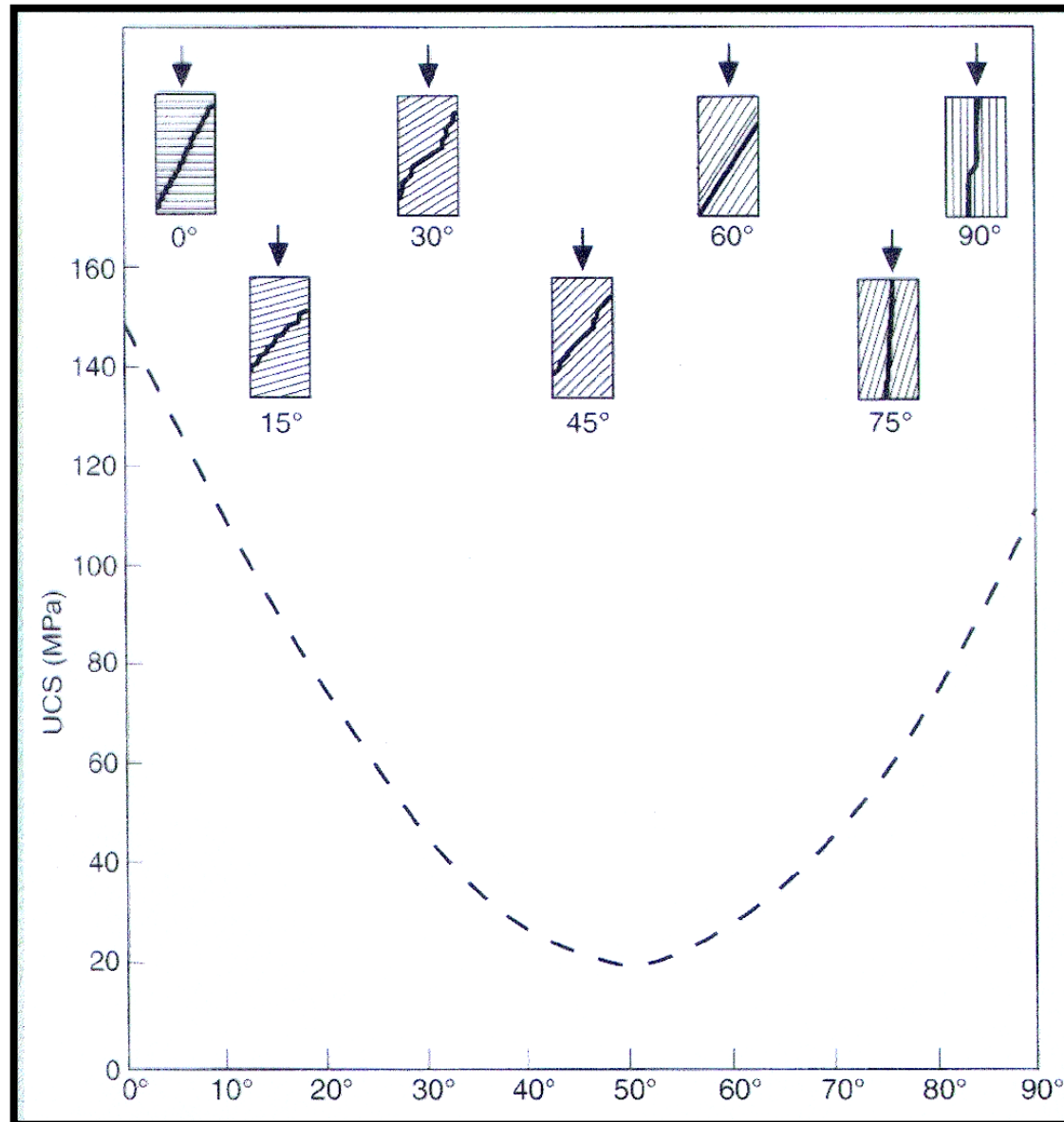
- Descrição:
  - Natureza (tipo, rugosidade, orientação)
  - Espaçamento
  - Abertura
  - Preenchimento
  - Número de famílias
- Resistência
- Percolação



# Influência das descontinuidades nas obras de engenharia



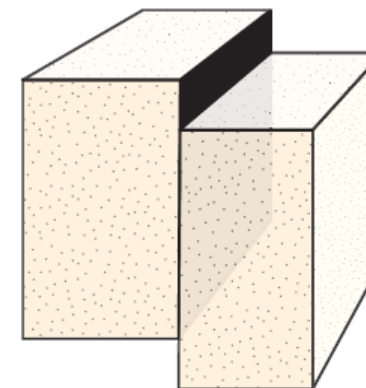
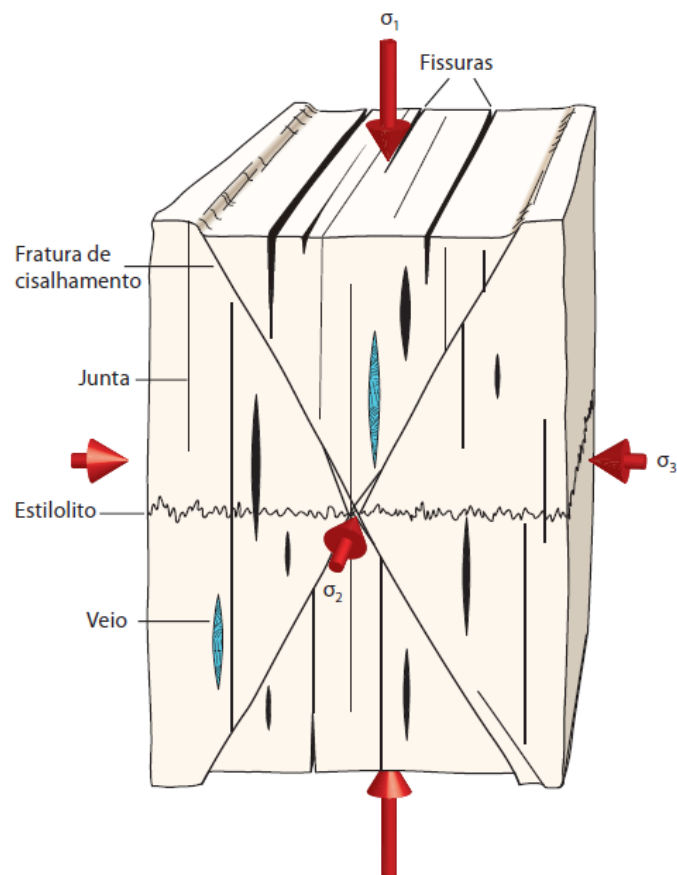
# RCS - EFEITOS DA POSIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES



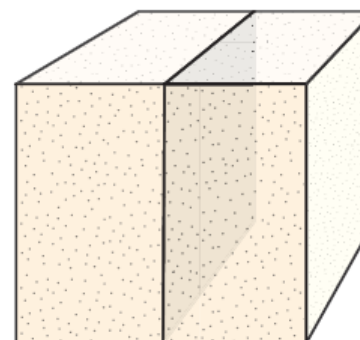
*Varição na resistência à compressão uniaxial de ardósia em função da xistosidade.*

*(BROWN ET AL. 1977 in HAWKINS 1998)*

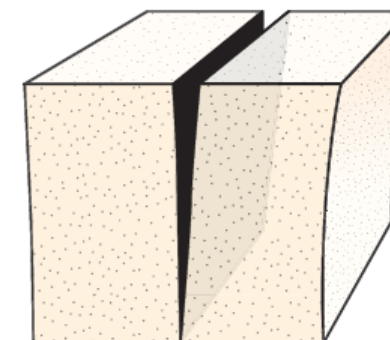
# Fraturas de origem tectônica (rúptil)



Fratura de cisalhamento



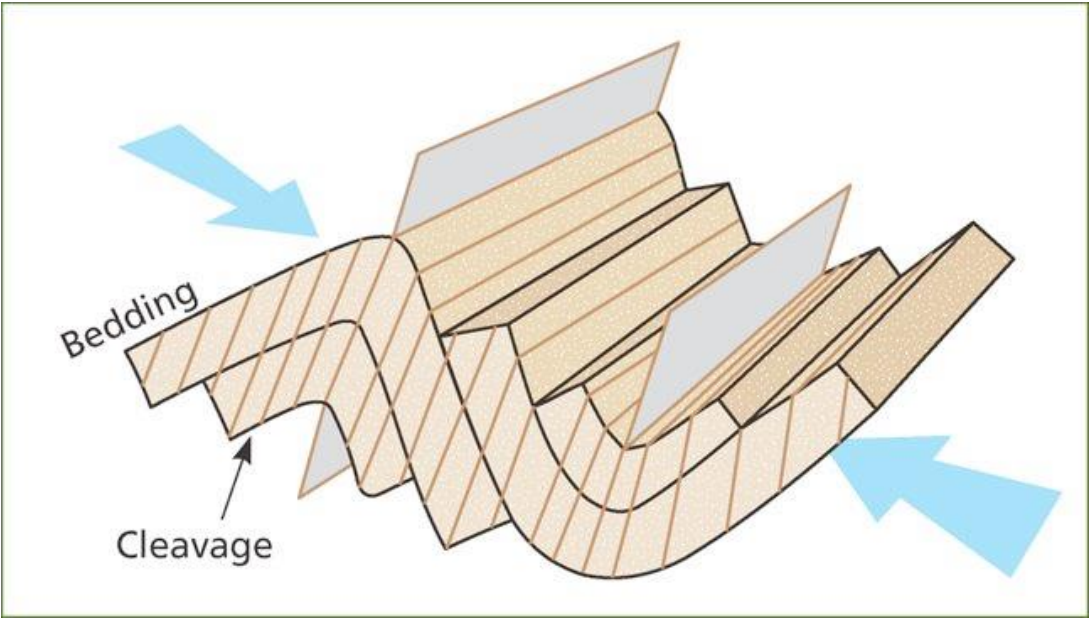
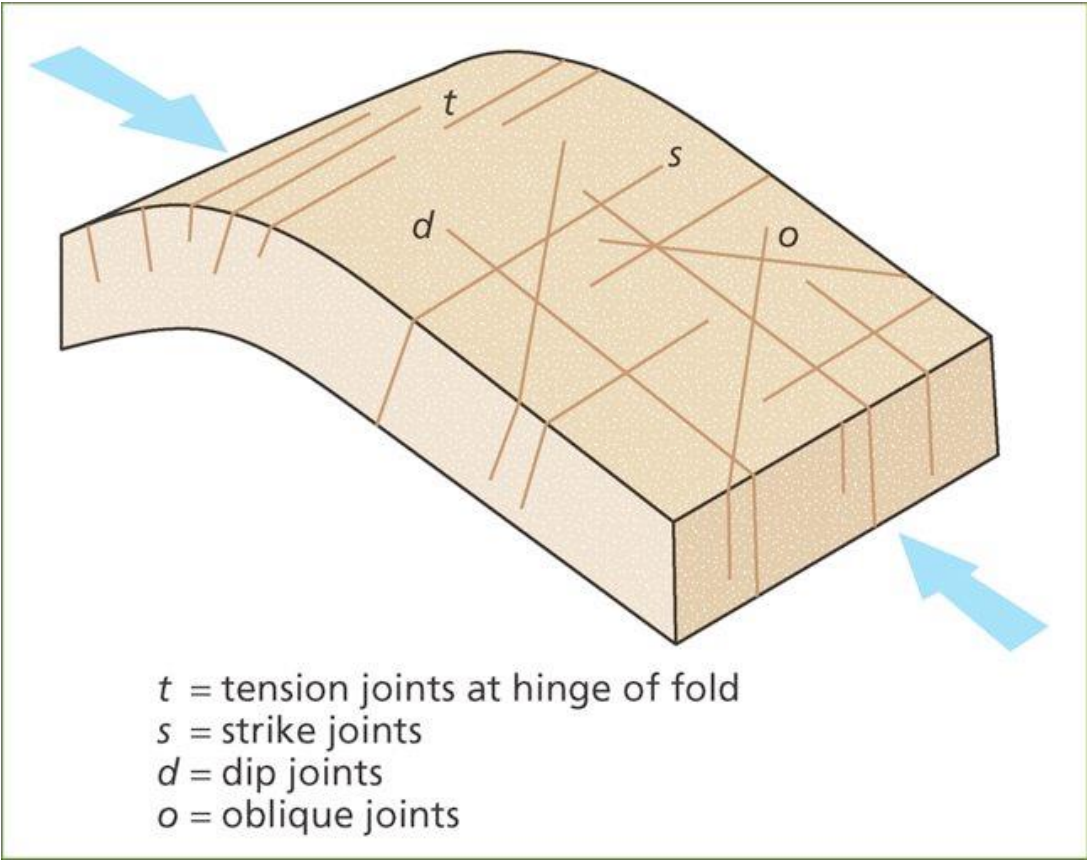
Fratura extensional: junta



Fratura extensional: fissura

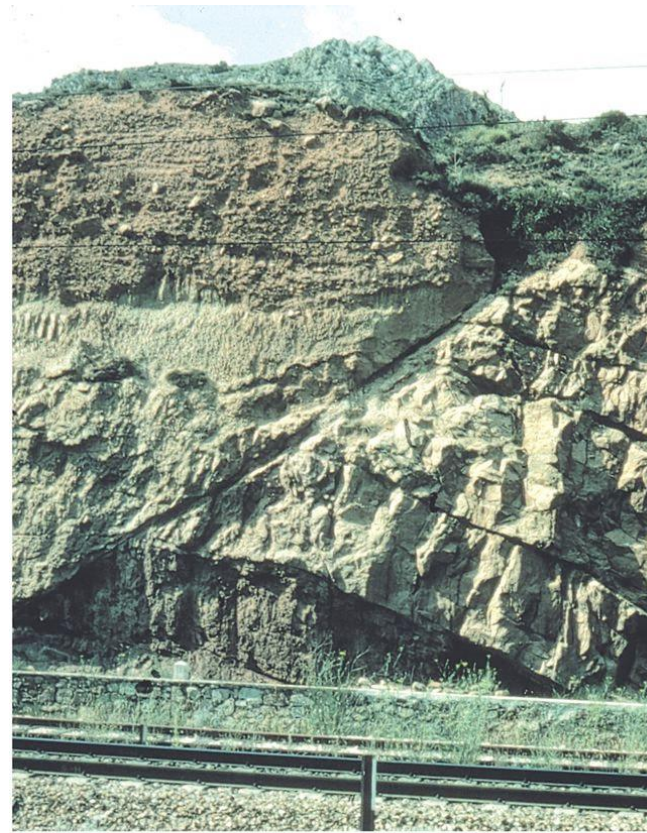
(Fossen, 2012)

# Juntas de origem tectônica (dúctil/rúptil)





# Tipo de descontinuidades - Falhas



a)

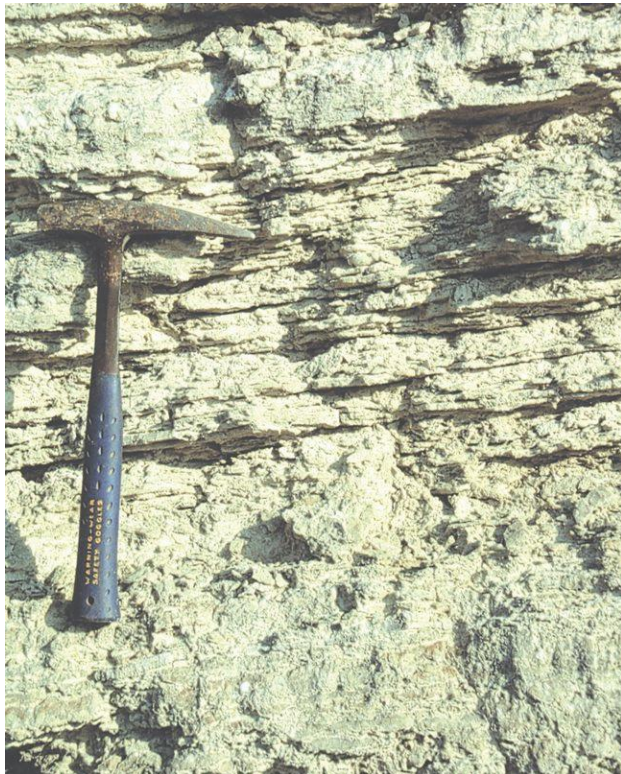


b)



# Descontinuidades tectônicas

**Xistosidade**



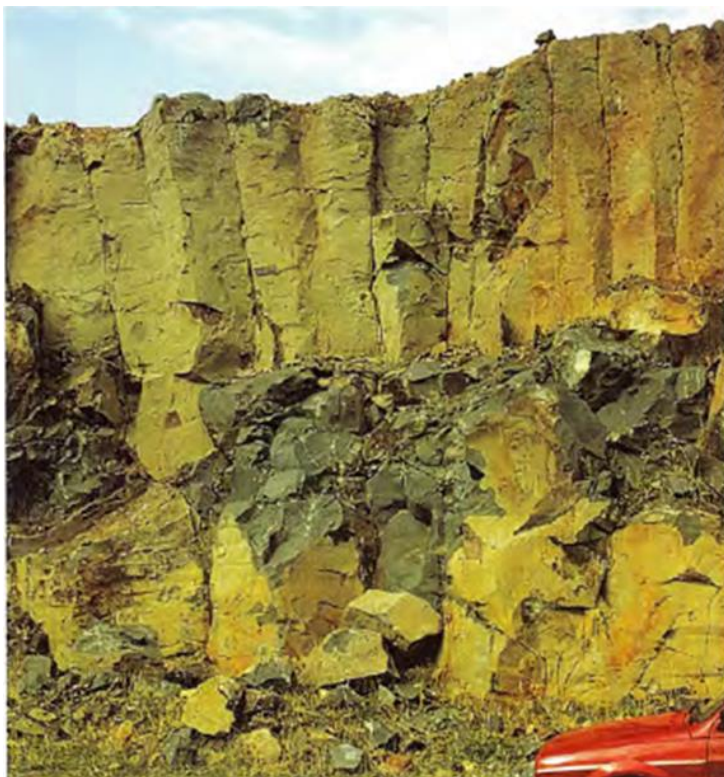
**Fraturas**





# Juntas não tectônicas

**Disjunção colunar**



**Acamamento**



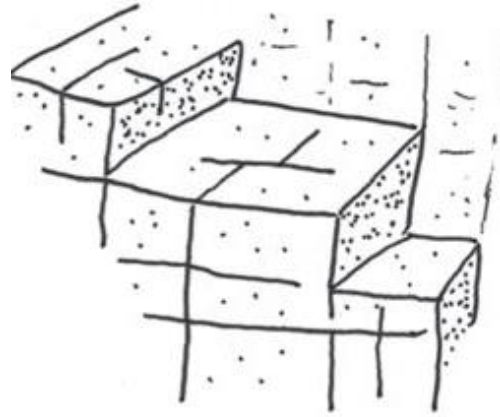


# Juntas de dilatação



# Forma

PADRÕES TÍPICOS – TERMOS DESCRITIVOS



Blocky



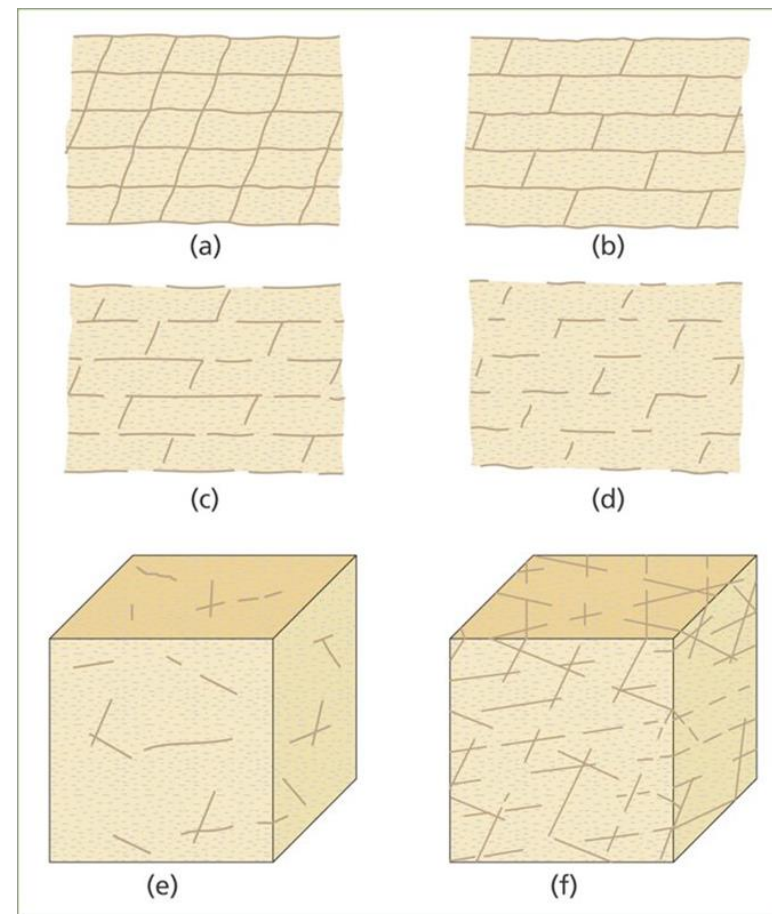
Tabular



Columnar

# Persistência (continuidade)

Persistência (ISRM)	Comprimento (m)
Muito baixa	< 1
Baixa	1-3
Média	3-10
Alta	10-20
Muito alta	> 20

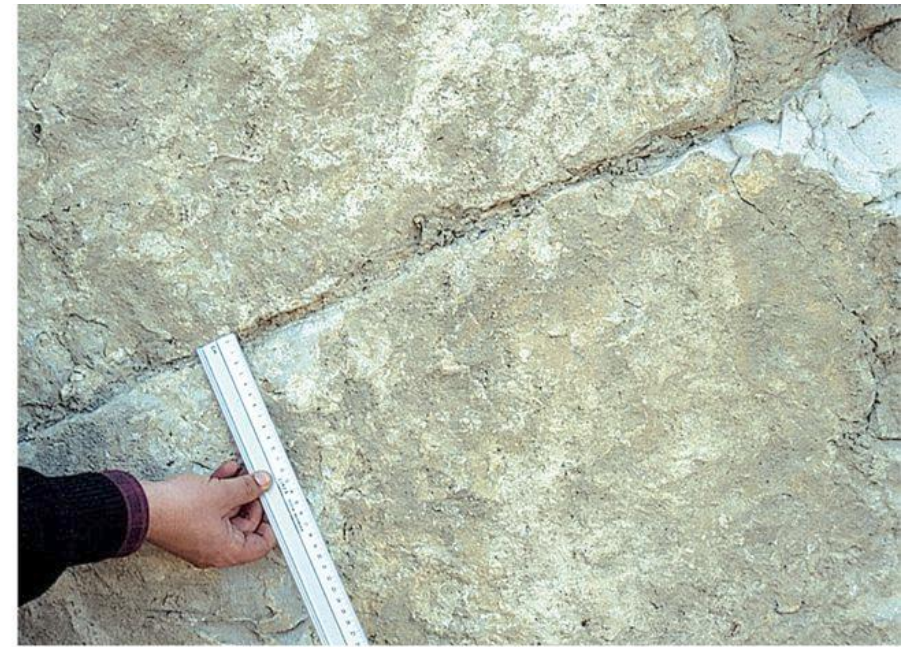




ABERTURA E  
PREENCHIMENTO



a)



b)



c)



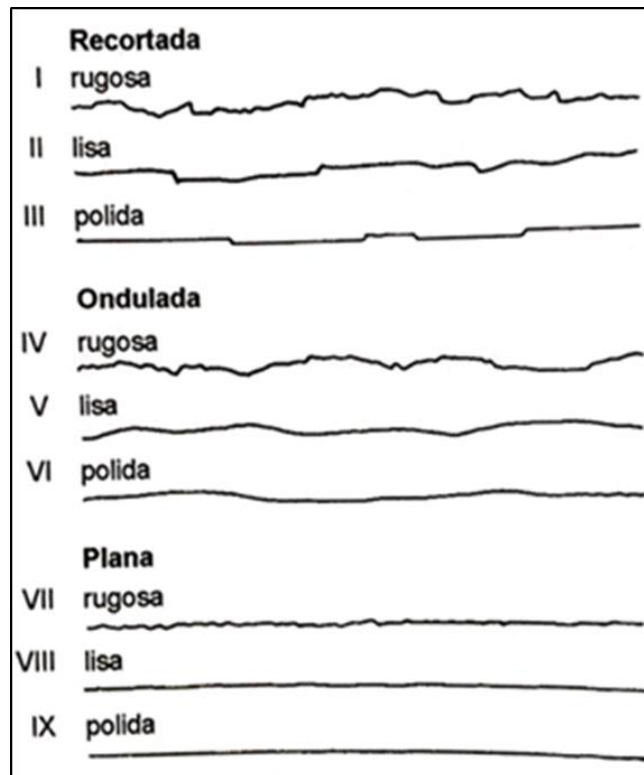
### Grau de fraturamento IPT, 1981 - modificado de Bieniewski (1987)

Grau de fraturamento	Simbolo	Nº de fraturas por metro
Ocasionalmente fraturado	F1	$\leq 1$
Pouco fraturado	F2	2 – 5
Medianamente fraturado	F3	6 – 10
Muito fraturado	F4	11 – 19
Extremamente fraturado	F5	$\geq 20$

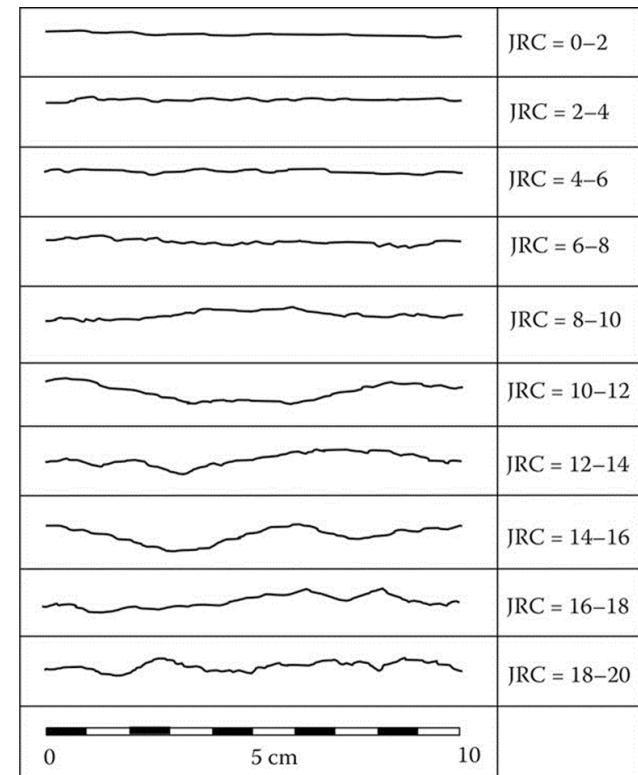


# Perfis de rugosidade

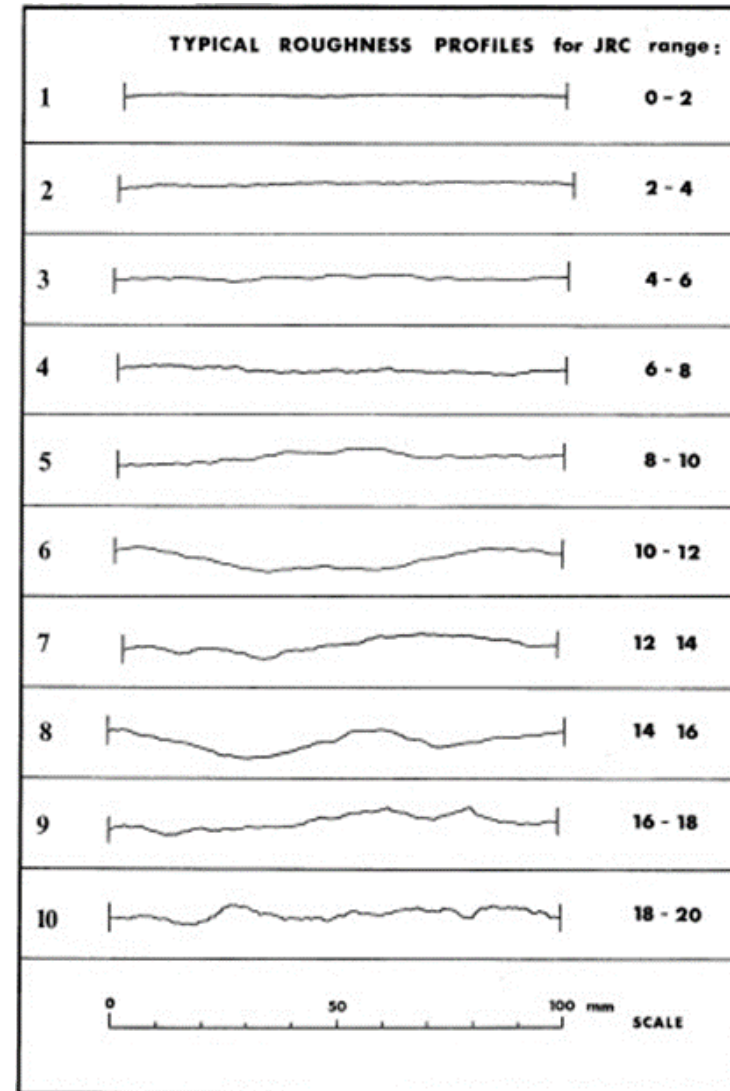
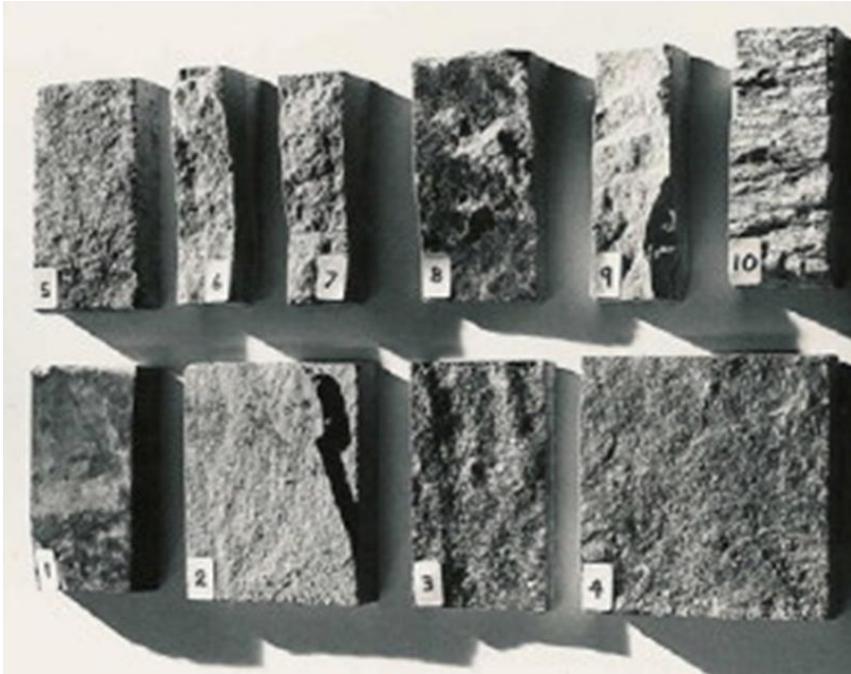
## ISRM (1981)



## JRC – Barton and Choubey (1977)



# Exemplos de JRC



**Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses:**

**Problems and some solutions**

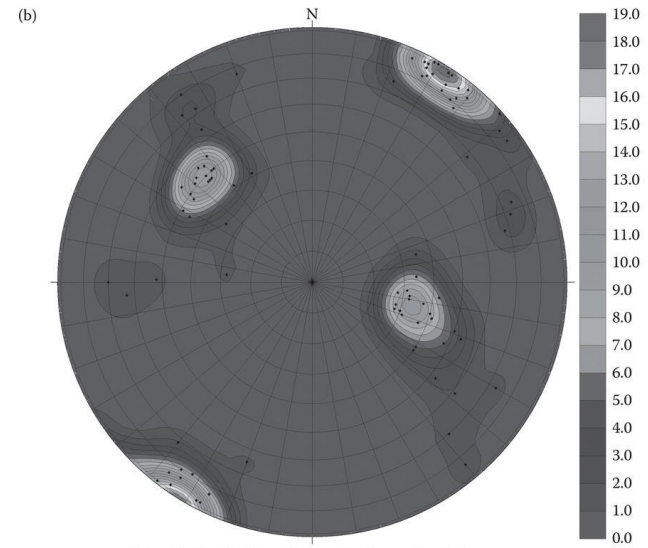
Nick Barton

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering , Volume 5, Issue 4, 2013, 249-261

# ORIENTAÇÃO

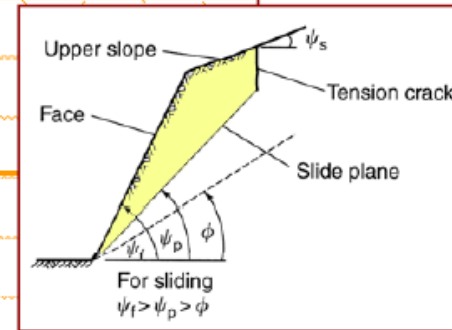
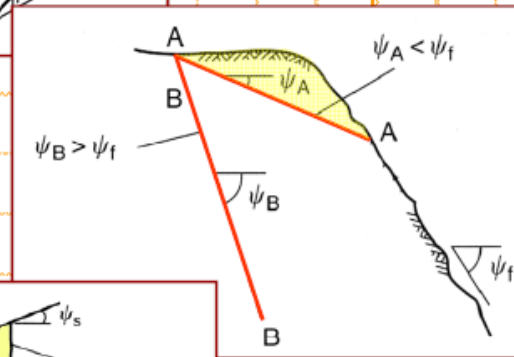
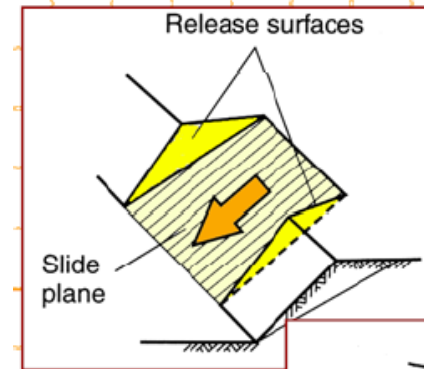
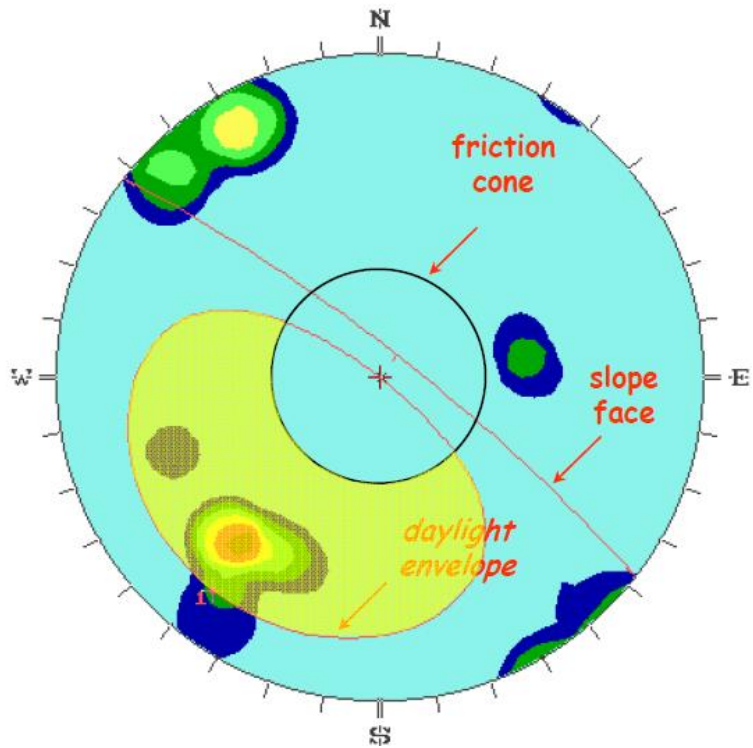
REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS  
MEDIDAS DE CAMPO NO ESTEREOGRAMA

(PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA)

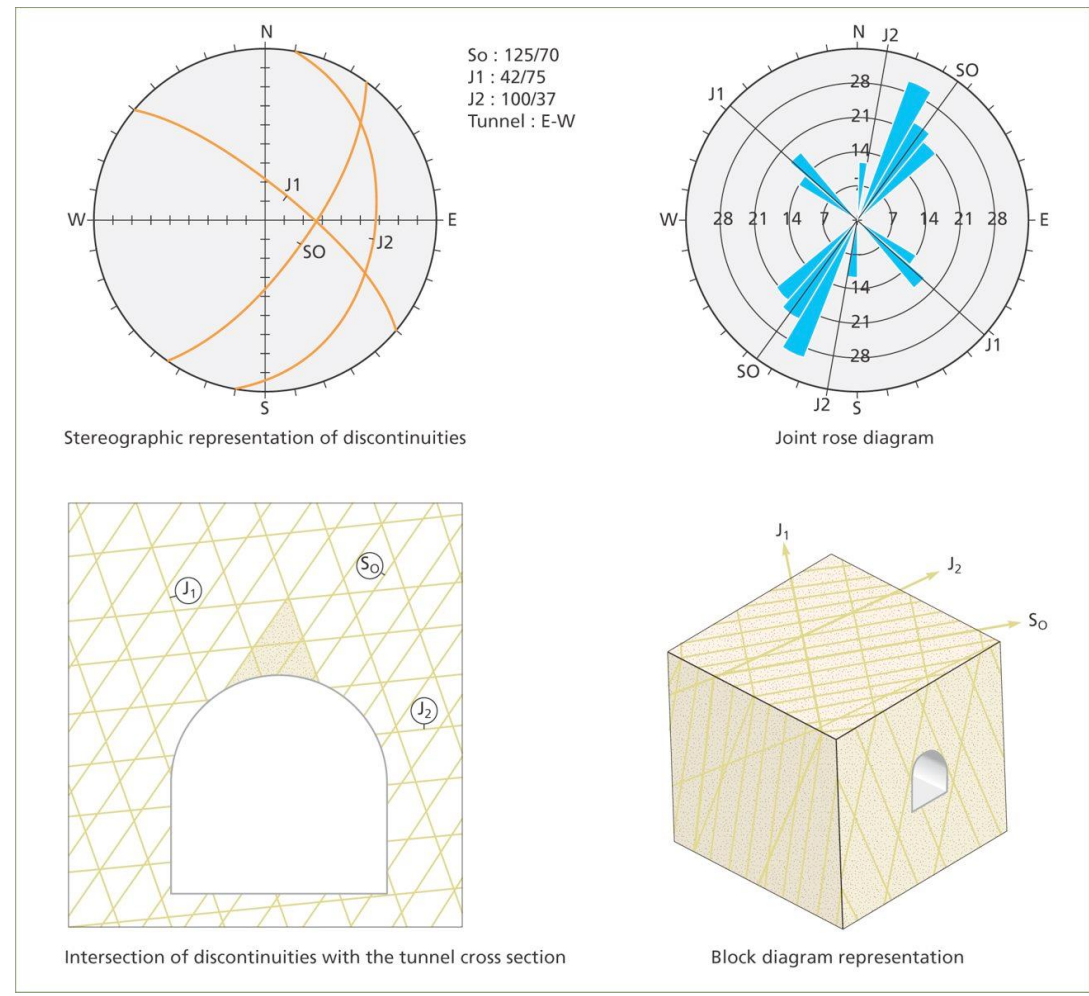


Polar plot Lambert equal area net – Lower hemisphere

# Análise cinemática



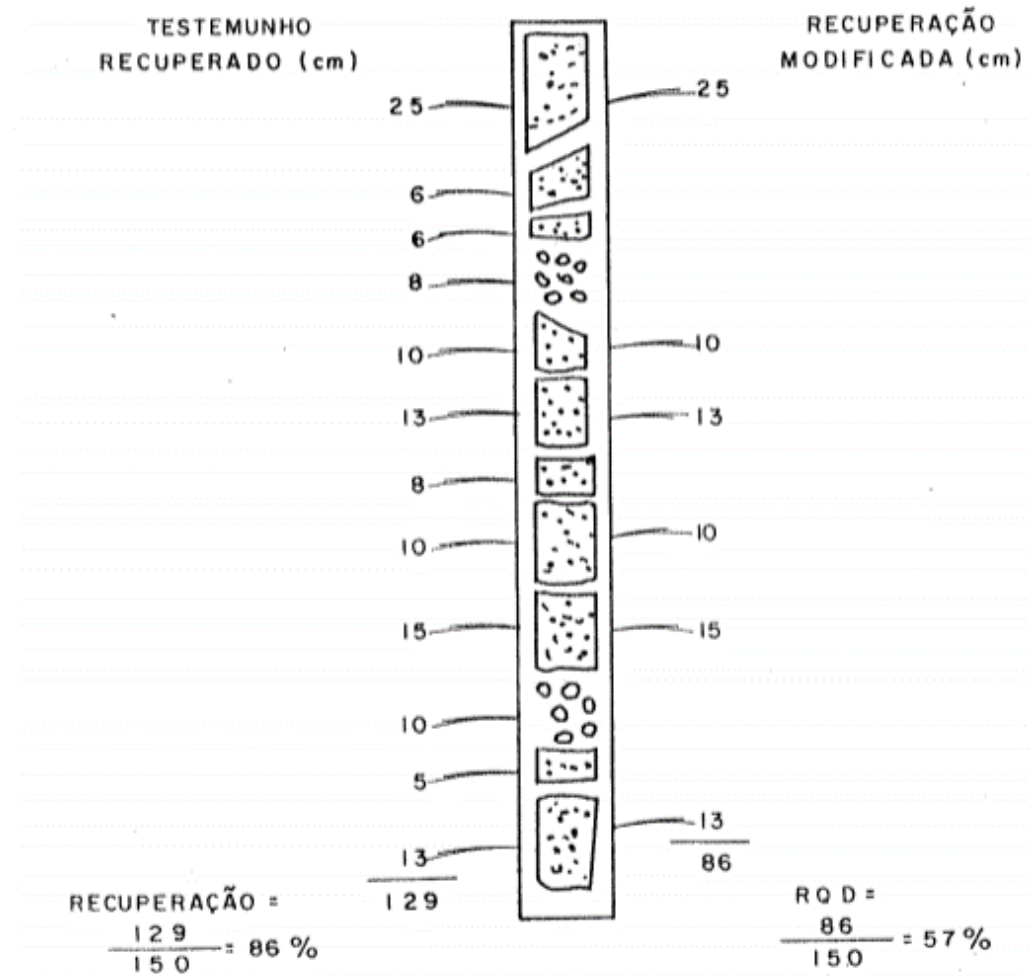
# Análise de descontinuidades



# Parâmetros

GRAU DE RECUPERAÇÃO

RQD - ROCK QUALITY DESIGNATION



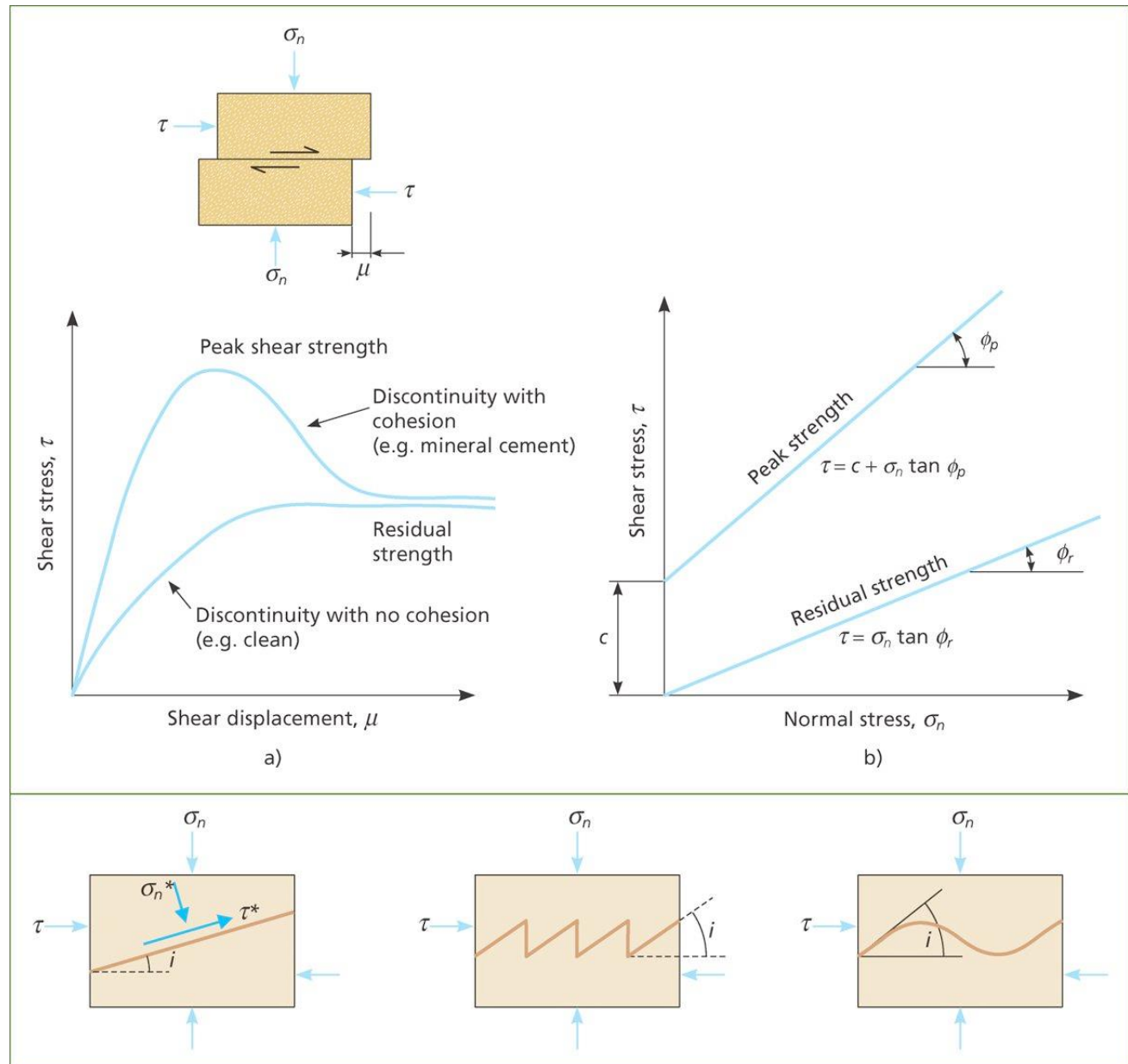


Resistência ao cisalhamento das  
descontinuidades:  
Ruptura baseada na influência da  
rugosidade:

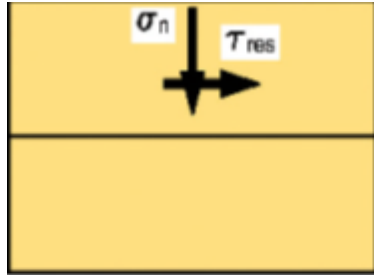
O principal componente da  
resistência ao cisalhamento é o  
ângulo de atrito. Este é  
composto por:

- ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ) e
- ângulo de rugosidade ( $i$ )

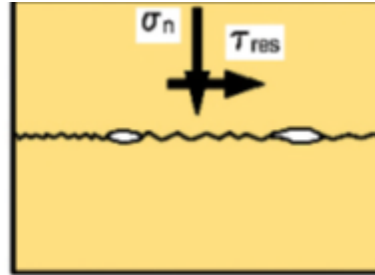
$$\phi = \phi_b + i$$



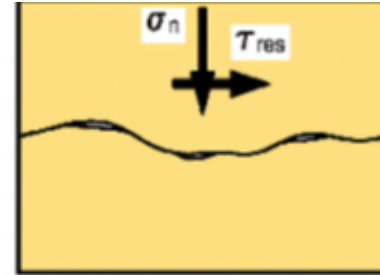
# Tipos de descontinuidades



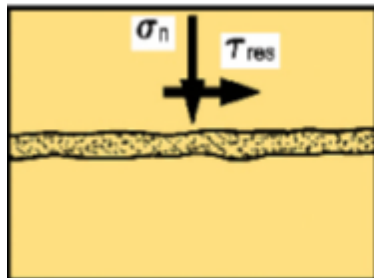
**PERSISTENTE,  
PLANAR, LISA**



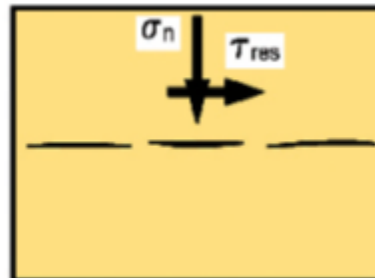
**PERSISTENTE,  
PLANAR, RUGOSA,  
NÃO TOTALMENTE  
FECHADA**



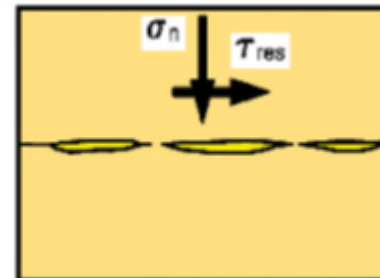
**PERSISTENTE,  
IRREGULAR,  
NÃO TOTALMENTE  
FECHADA**



**PERSISTENTE,  
PREENCHIDA**



**NÃO PERSISTENTE,  
FECHADA**



**NÃO PERSISTENTE,  
ABERTA/PREENCHIDA**

# Critério de ruptura Bilinear (Patton, 1966)

DIFERENTES MODOS DE RUPTURA CISALHANTE DE UMA DESCONTINUIDADE ABERTA, RUGOSA E PERSISTENTE.

a) Se  $\sigma_n < \sigma_{ns}$ :

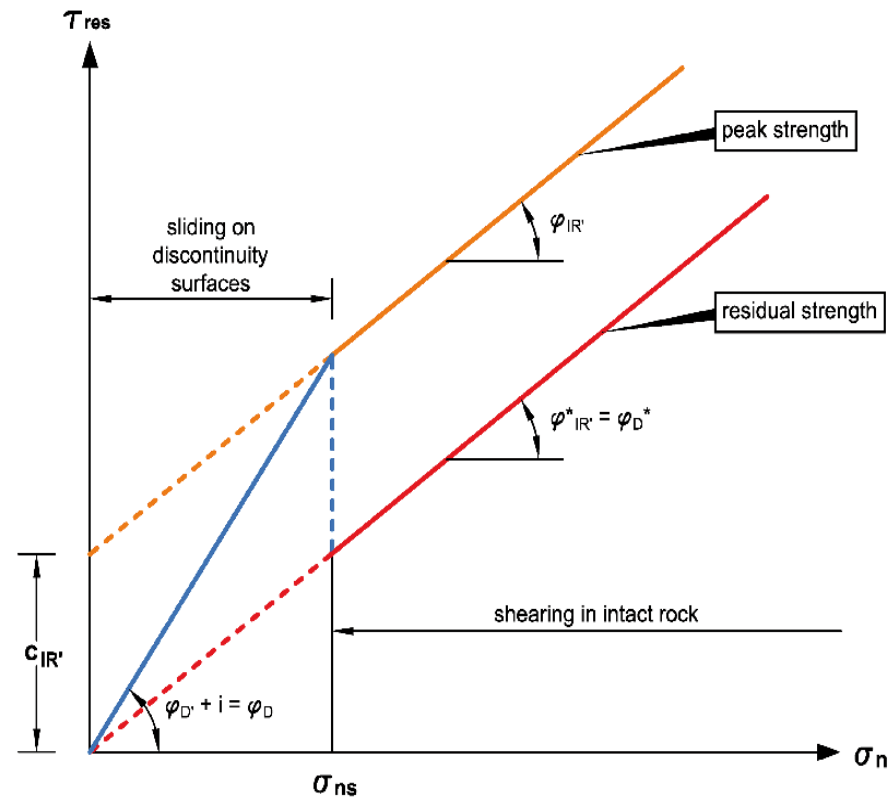
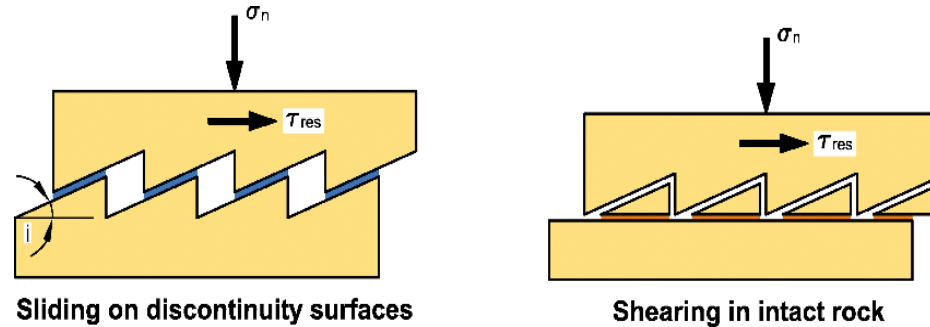
Deslizamento ao longo da descontinuidade:

$$\tau_R = \sigma_n \tan(\phi_r + i)$$

b) Se  $\sigma_n > \sigma_{ns}$ :

Ruptura da rocha intacta:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi_r$$



Bilinear and discontinuous failure criteria

(Wittke, 2014)

# Critério de ruptura de Barton e Choubey (1973)

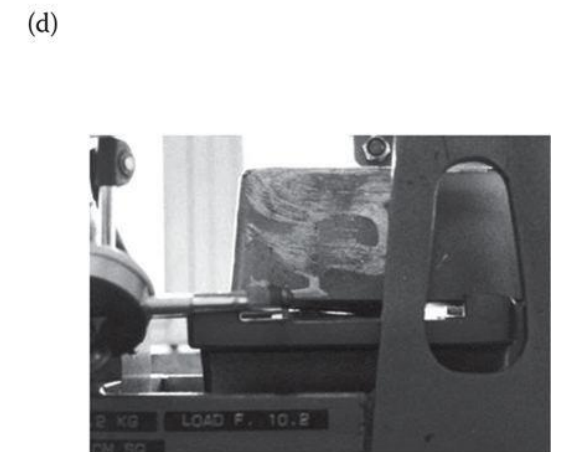
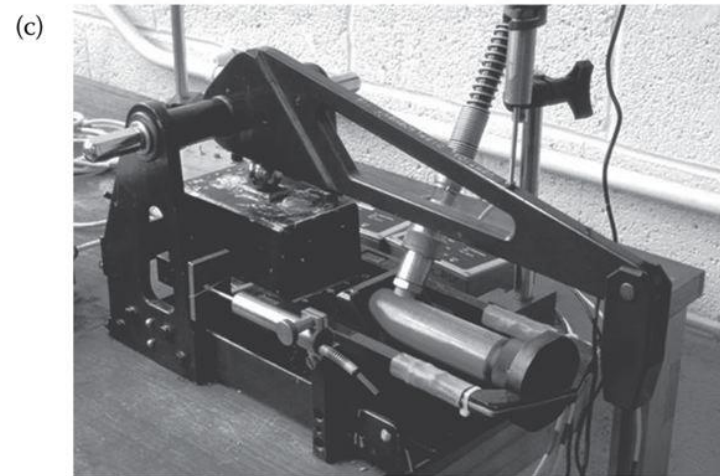
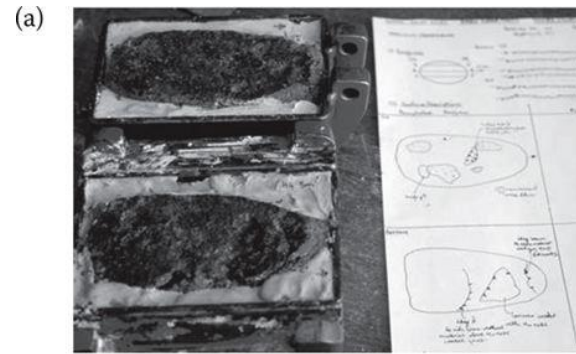
$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ JRC \times \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right]$$

- $\phi_r$  - ângulo de atrito residual
- $\sigma_n$  - tensão normal atuando na junta.
- $JCS$  - resistência à compressão simples das paredes (obtida com o Martelo de Schmidt).

# Testes em descontinuidades

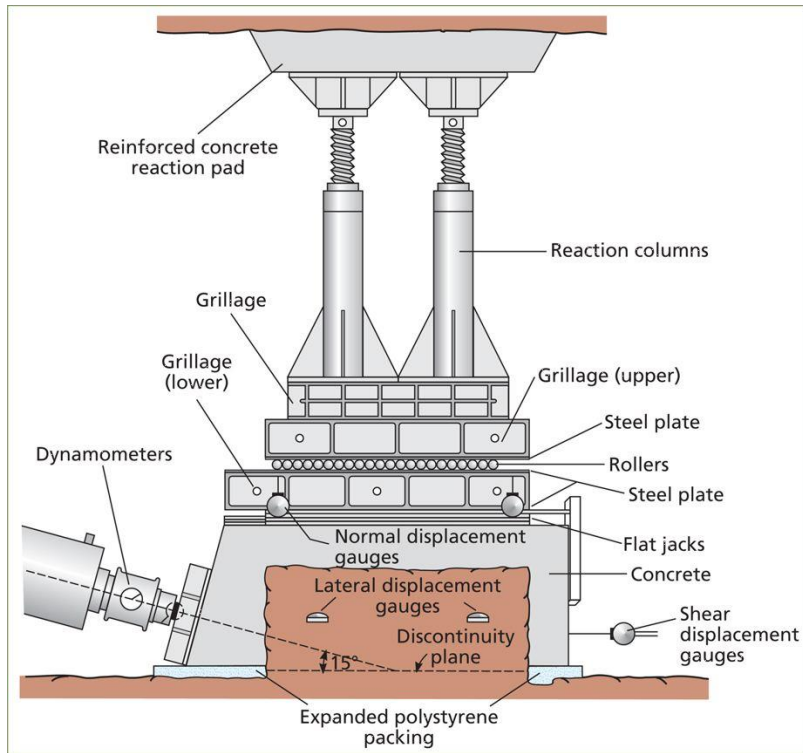
a) e b) Medida de rugosidade

c) E d) Ensaio de cisalhamento direto





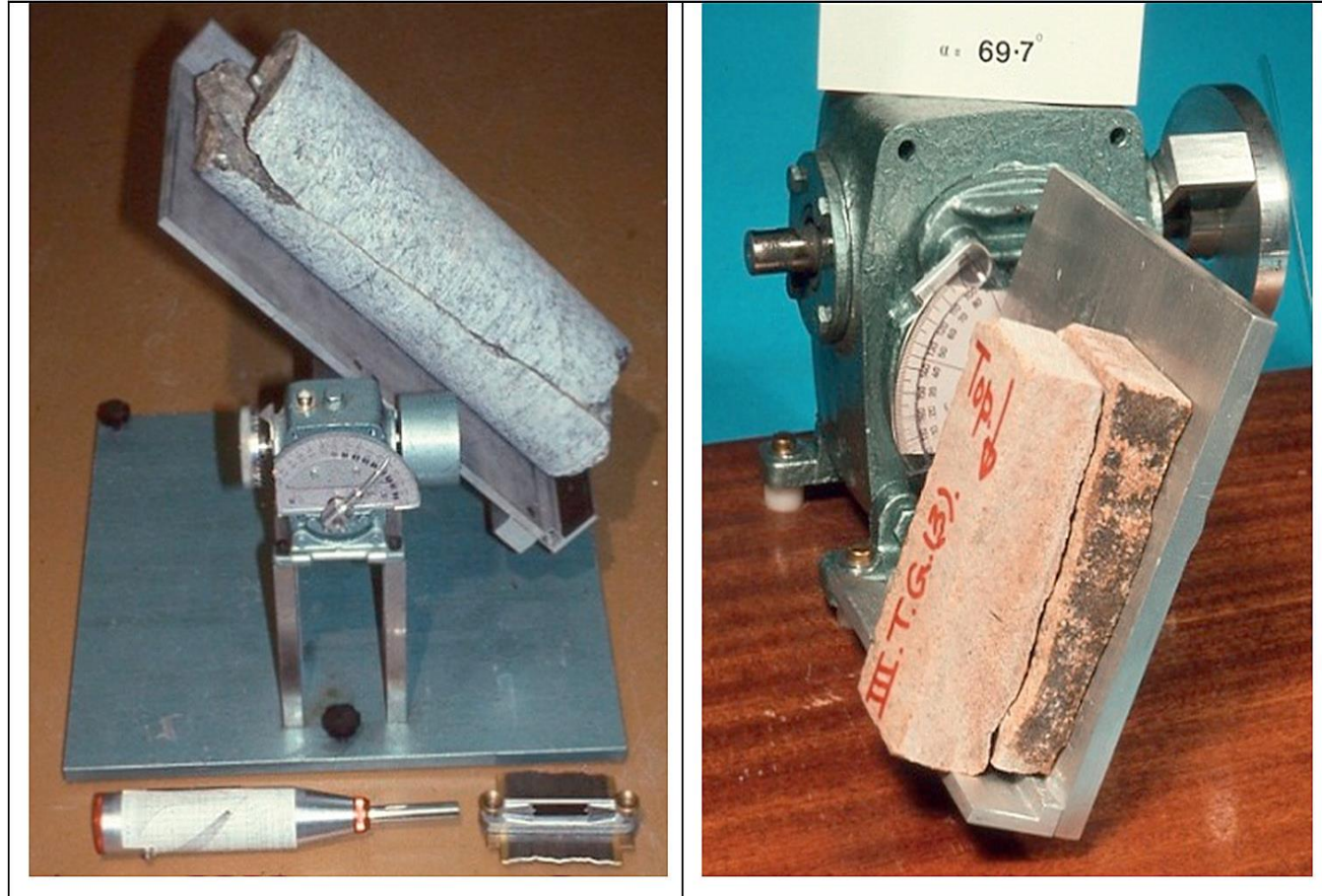
# Ensaio de cisalhamento em campo



*Tilt-test* – medida do ângulo de atrito em descontinuidades sem coesão ( $\phi_r + i$ ).

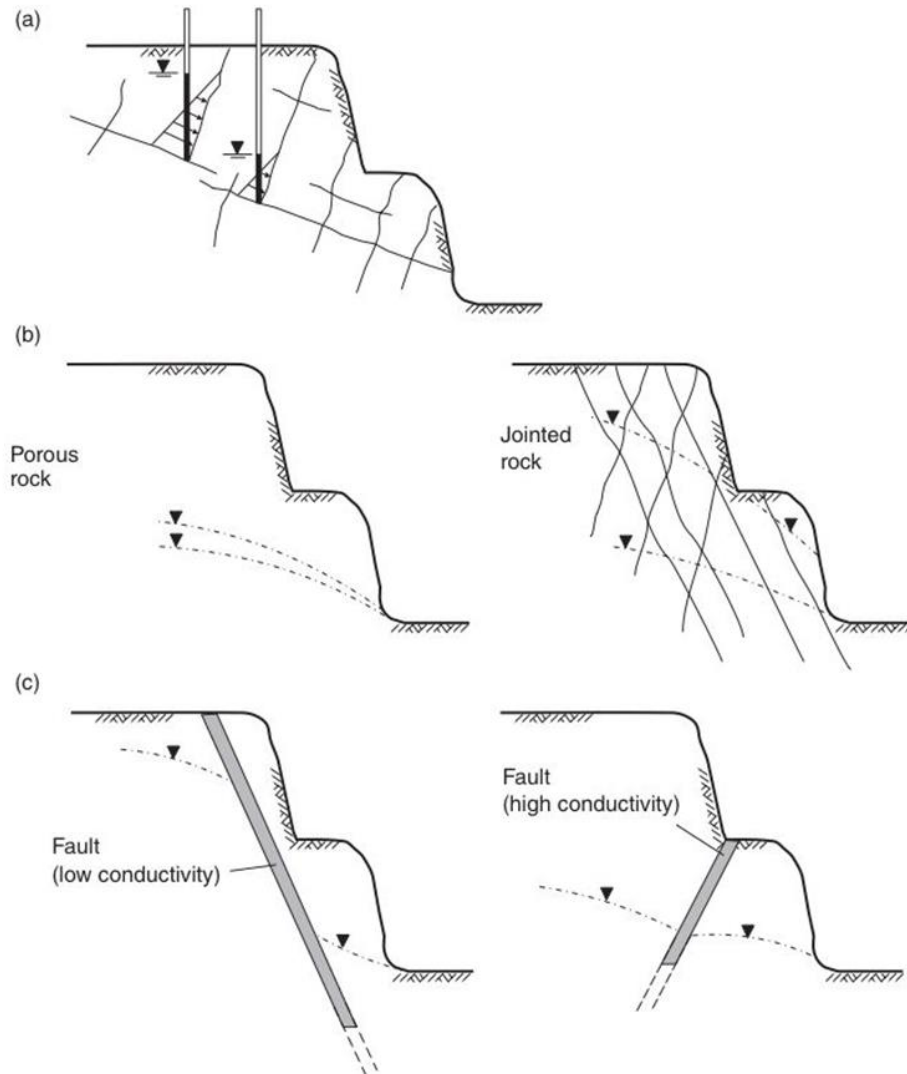
$$JRC = (\alpha - \phi_r) / \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)$$

(Barton & Choubey, 1973)



# FLUXO EM MEIOS DESCONTÍNUOS

## COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DAS DESCONTINUIDADES



a) **meio descontínuo** – fluxo é descrito em uma fratura ou um conjunto de fraturas

b) **meio contínuo** – o maciço fraturado tem comportamento semelhante a um meio poroso

c) Falhas atuando como barreiras hidráulicas ou drenos

# Influência do espaçamento e abertura das fraturas no K de maciços rochosos (Hoek & Bray, 1981)

Para o maciço rochoso:

$$K_r = \frac{Na^3\gamma_\omega}{12\mu}$$

Para uma fratura:

$$K_f = \frac{a^2\gamma_\omega}{12\mu}$$

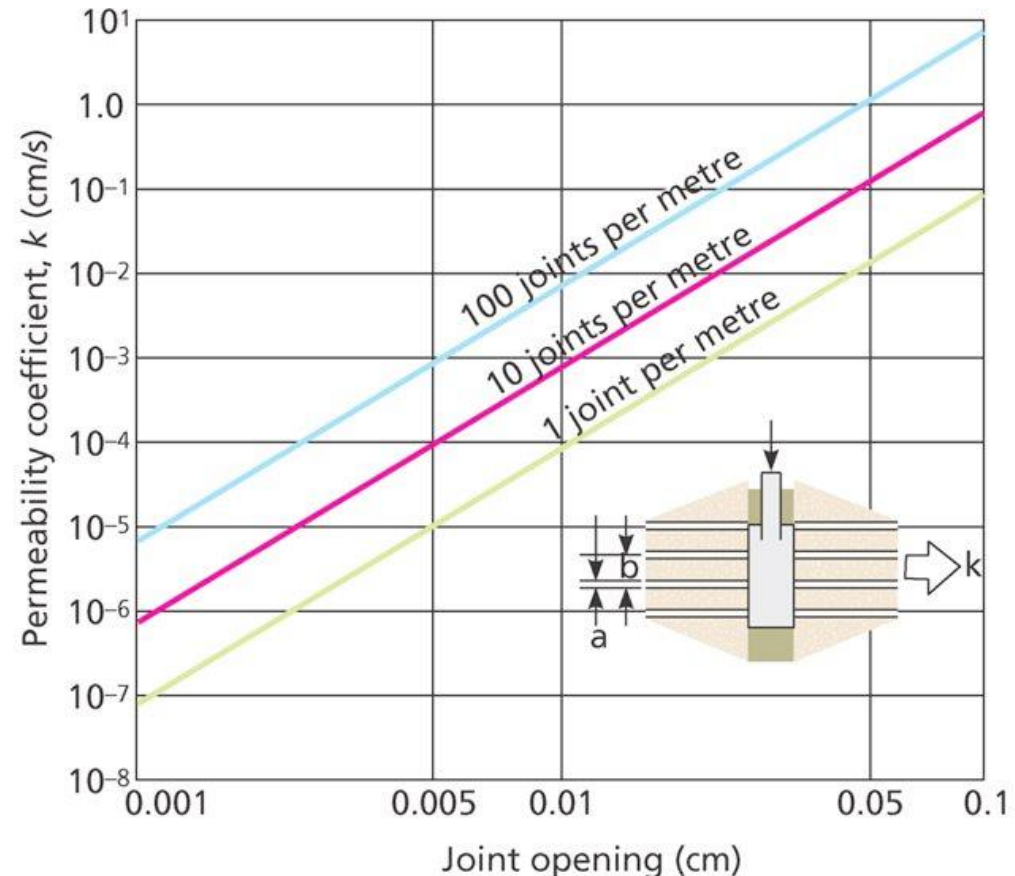
N = número de fraturas por metro

a = abertura das fraturas

$\gamma_\omega$  = peso específico da água

$\mu$  = coeficiente de viscosidade dinâmica da água

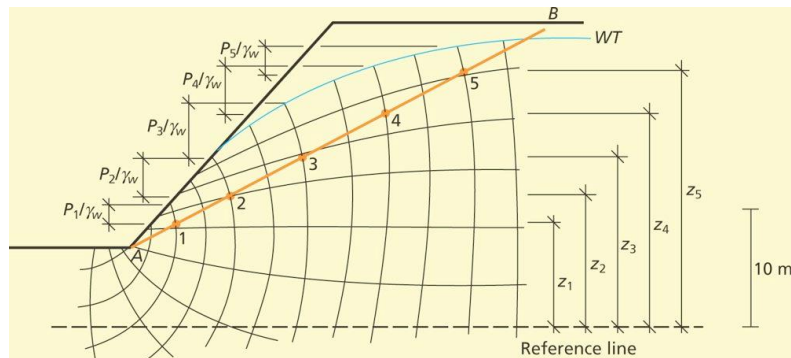
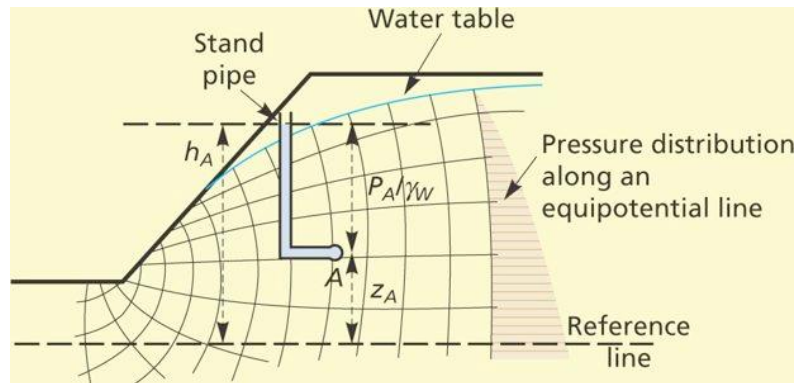
(0,01005 g/s.cm a 20°)



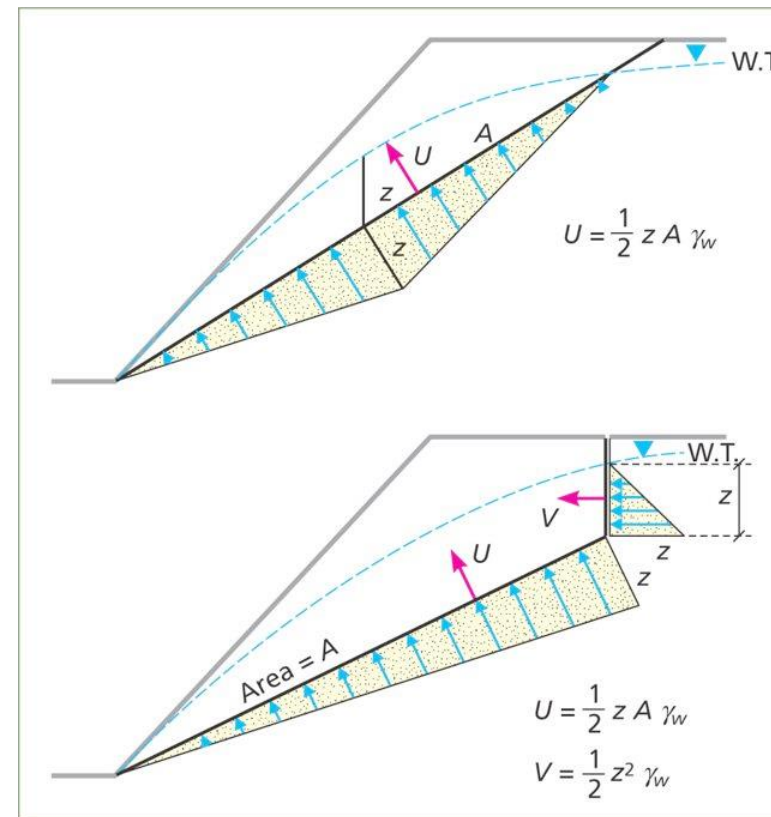


# Distribuições das pressões

## MEIO POROSO



## MEIO FRATURADO





“Escavabilidade” (excavability) = facilidade ou dificuldade de escavação :

- Resistência da matriz rochosa (mineralogia, textura, estrutura)
- Dureza e abrasividade (mineralogia)
- Fraturamento do maciço
- Índices de qualidade mecânica (RQD, classificações geomecânicas)
- Velocidade de propagação das ondas sísmicas

# Categorias de materiais de escavação (DER/DNER)

- 1ª categoria – solos – escavação com utilização de trator de lâmina, *motoscraper*, pás-carregadeira, etc.
- 2ª categoria – rochas brandas (baixa dureza) – escavação com utilização combinada de escarificadores (*ripper*) e uso descontínuo de explosivos de baixa potência.
- 3ª categoria – rocha dura, ou presença de matacões com volume maior ou igual a  $0,5\text{m}^3$  - desmonte com emprego contínuo de explosivos de alta potência.

**1ª categoria**



**2ª categoria**

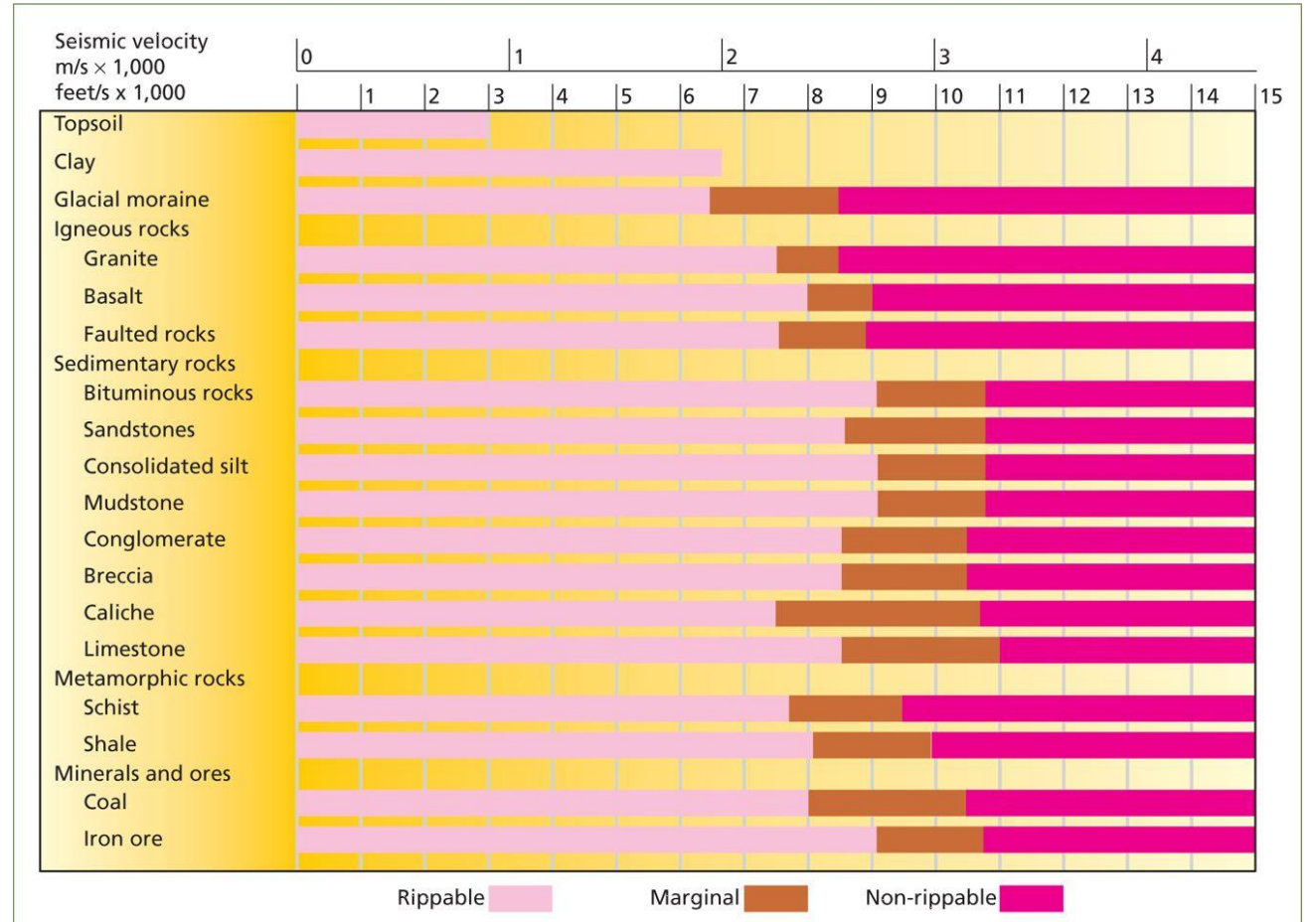




# Escarificadores (*rippers*)



ESCAVABILIDADE DE VÁRIOS TIPOS DE MATERIAIS UTILIZANDO UM ESCARIFICADOR CATERPILLAR D10-R.





## Utilizando *ripper* na faixa de 200/300 HP (CAT D8-R)

Velocidade sísmica (m/s)	Escarificação	Equipamento	Classificação provável
< 450	Não necessita	Equipamentos normais	1ª categoria
450 - 900	Escarificação leve	Trator com <i>ripper</i>	Transição
900 – 1.200	Escarificação média	Trator com <i>ripper</i>	2ª categoria
1.200 – 1.500	Escarificação pesada	Trator com <i>ripper</i>	2ª categoria
1.500 – 1.800	Escarificação muito pesada	<i>Ripper</i> e/ou explosivo	2ª categoria (c/ explosivo)
> 1.800	Não esscarificável	Desmonte com rocha	3ª categoria

ESCAVABILIDADE EM FUNÇÃO DA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E  
GRAU DE FATURAMENTO.

