

GEOLOGIA ESTRUTURAL

Aula 2

Análise da Tensão (stress)

Análise da Deformação (strain)

Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

ANÁLISE DA TENSÃO E DA DEFORMAÇÃO (COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ROCHAS)

- O estado de tensão propicia deformação/movimentação (cinemática) e resulta na forma final (geometria) da rocha.
- Força ou tração: agente responsável pelos movimentos das rochas submetendo-as a solicitações diversas. Caso a solicitação seja tangencial ocorre o cisalhamento, que pode ser subdividido em componente normal (τ_n) e componente de cisalhamento (τ_s).

A intensidade da força (ou tração) depende da área da superfície por onde é distribuída.

CONCEITOS

STRESS E STRAIN

- Stress significa "tensão" ou "esforço". A tensão é a força/área (N/m^2) necessária para produzir deformação (strain).
- Strain significa "deformação". É uma grandeza escalar medida somente pelo comprimento.

Vetor é um quantitativo que possui magnitude e direção. Tensor é um quantitativo usado para descrever a propriedade física de um material.

Tanto o stress quanto o strain são materializados por elipsóides utilizados para representação espacial da tensão e da deformação, cujos eixos são inversamente proporcionais.

Tensão x Deformação (Profundidade)

- Um corpo rochoso está submetido a dois esforços, o litostático (similar à força da gravidade) e o tectônico. Ambos podem ser representados por elipsóides de tensão.

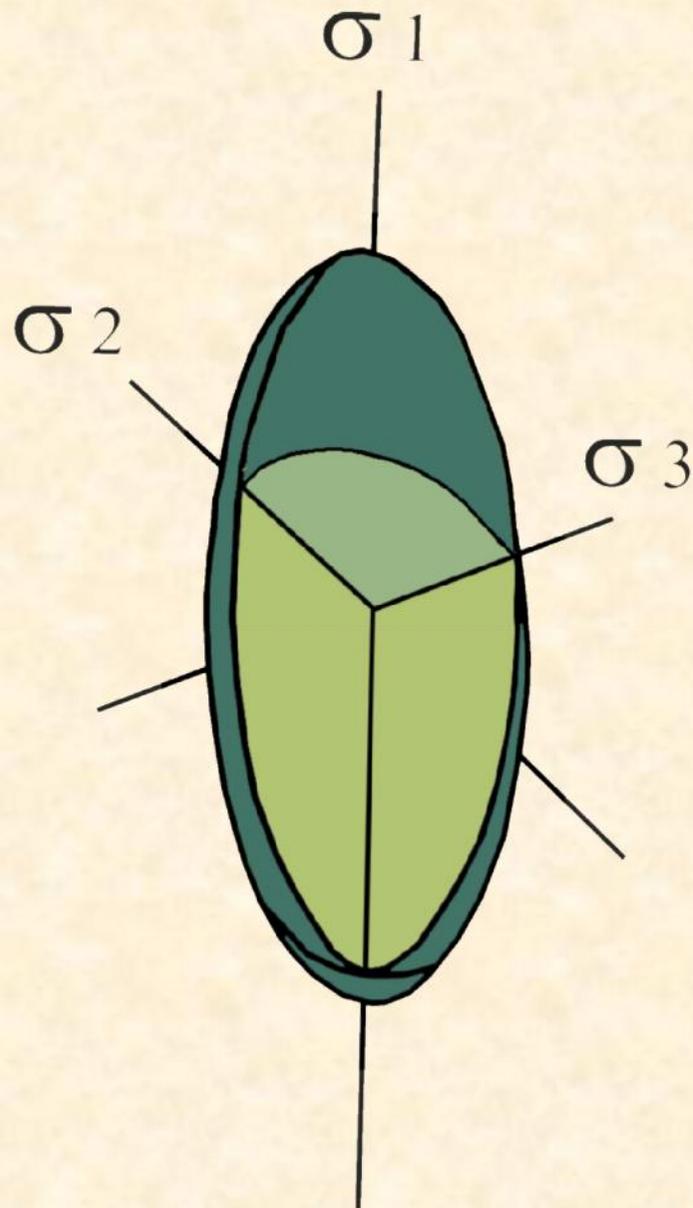
ELIPSÓIDES

Elipsóide de tensão (stress)

Em geral no interior de um grande corpo geológico, a orientação do stress varia de lugar para lugar, dependendo de vários fatores (espessura da crosta, reologia do material, natureza de estruturas pretéritas, existência de descontinuidades). Essa variação é conhecida como campo de tensão, que pode ser representado e analisado pelo digrama da trajetória de stress.

Nestes diagramas as linhas mostram a contínua variação na orientação do stress principal, considerando que τ_1 (S_{max}) sempre é perpendicular a τ_3 (S_{min}).

Assim, em cada ponto do objeto geológico o campo de tensão é representado por um sistema de eixos nominados pela letra (grega) " τ ", onde $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$ (ordem decrescente de tensão).



O campo de tensão é caracterizado pelos eixos σ_1 , σ_2 e σ_3 , cuja representação gráfica é o elipsóide de tensão.

(lembrete: é um campo físico, portanto não representa um objeto concreto)

Elipsóide de deformação (strain)

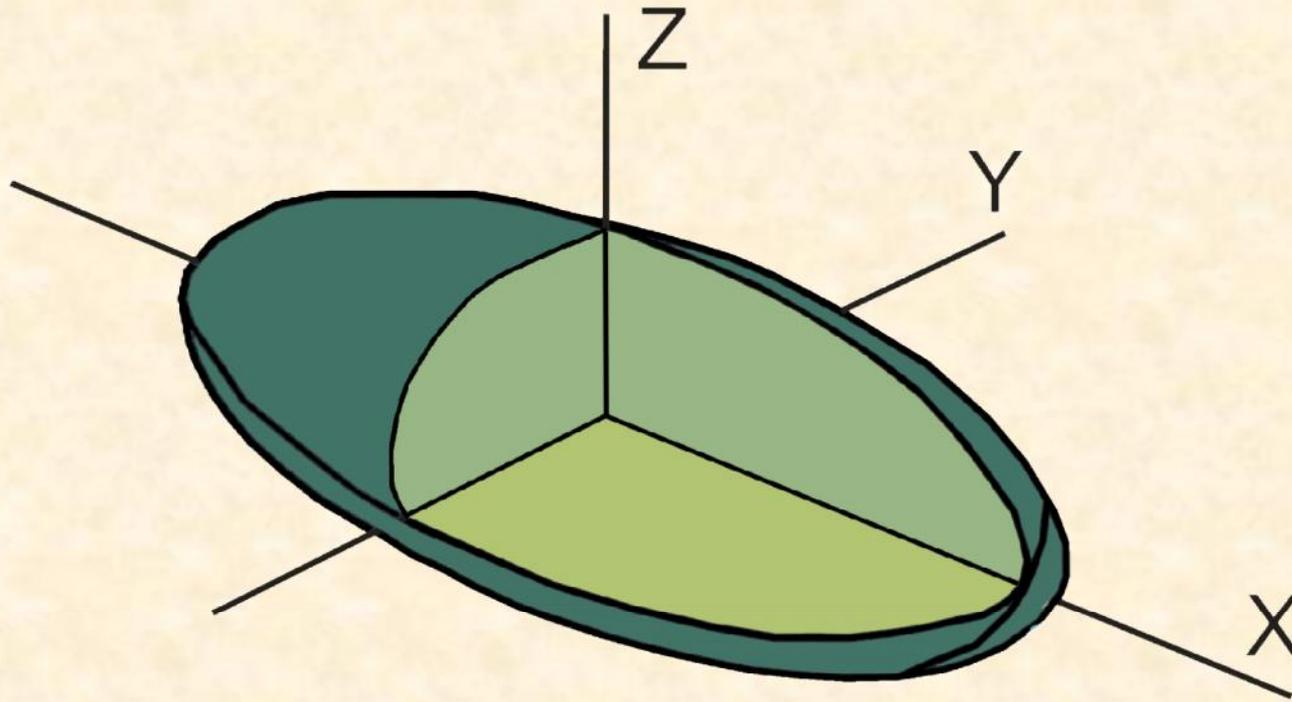
Eixos de deformação são representados pelas letras "x", "y", "z", cuja relação é $x > y > z$, ou seja, mostra ordem decrescente de deformação.

O elipsóide de tensão é inversamente proporcional ao elipsóide de deformação. Numa comparação aproximada:

$$\tau_1 \Leftrightarrow Z / \tau_2 \Leftrightarrow Y / \tau_3 \Leftrightarrow X$$

Os eixos dos elipsóides variam de acordo com o stress aplicado na superfície rochosa. Desta forma os eixos podem sofrer,

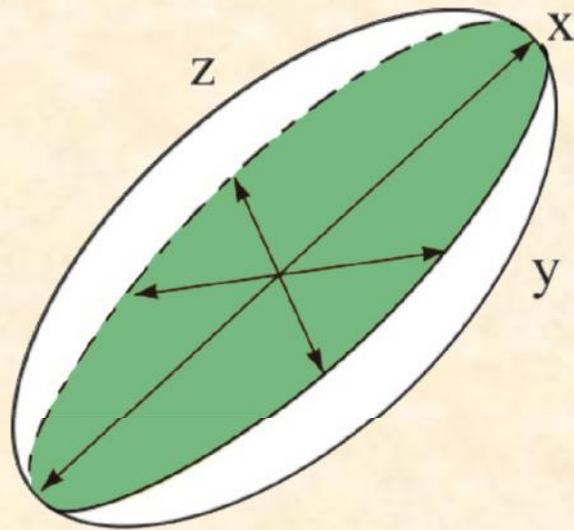
- (a) estiramento/encurtamento/encurtamento
- (b) estiramento/encurtamento/estiramento
- (c) encurtamento/estiramento/estiramento



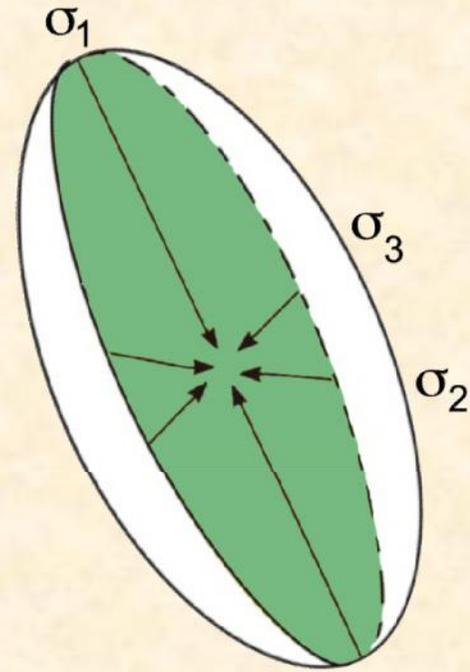
O campo de deformação é caracterizado pelos eixos X,Y,Z cuja representação gráfica é o elipsóide de deformação.

(lembrete: representa um objeto físico concreto, por exemplo um grão de quartzo estirado em um xisto)

Elipsóide de Deformação



Elipsóide de Tensão



Comparação entre os elipsóides de tensão e de deformação.

REOLOGIA

Conceitos

- Reologia estuda o comportamento físico das rochas, mediante a aplicação de forças e tensões (stress).

As propriedades mecânicas da rocha refletem aspectos das forças e dos movimentos que os corpos experimentaram. As rochas possuem propriedades elásticas e plásticas concomitantes.



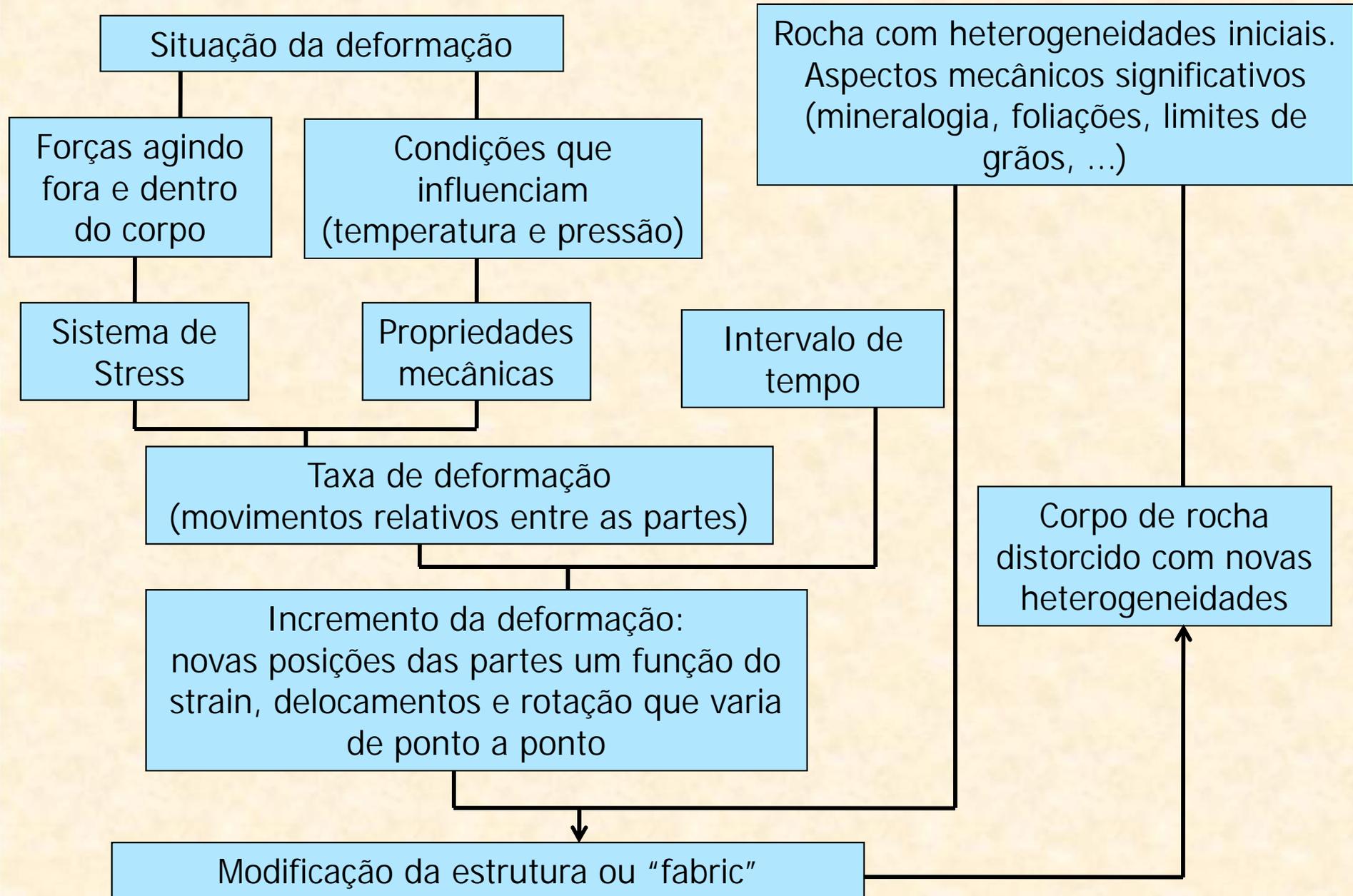
Xisto do Complexo Setuva,
Vale do Ribeira – PR.

Foto: E. Salamuni

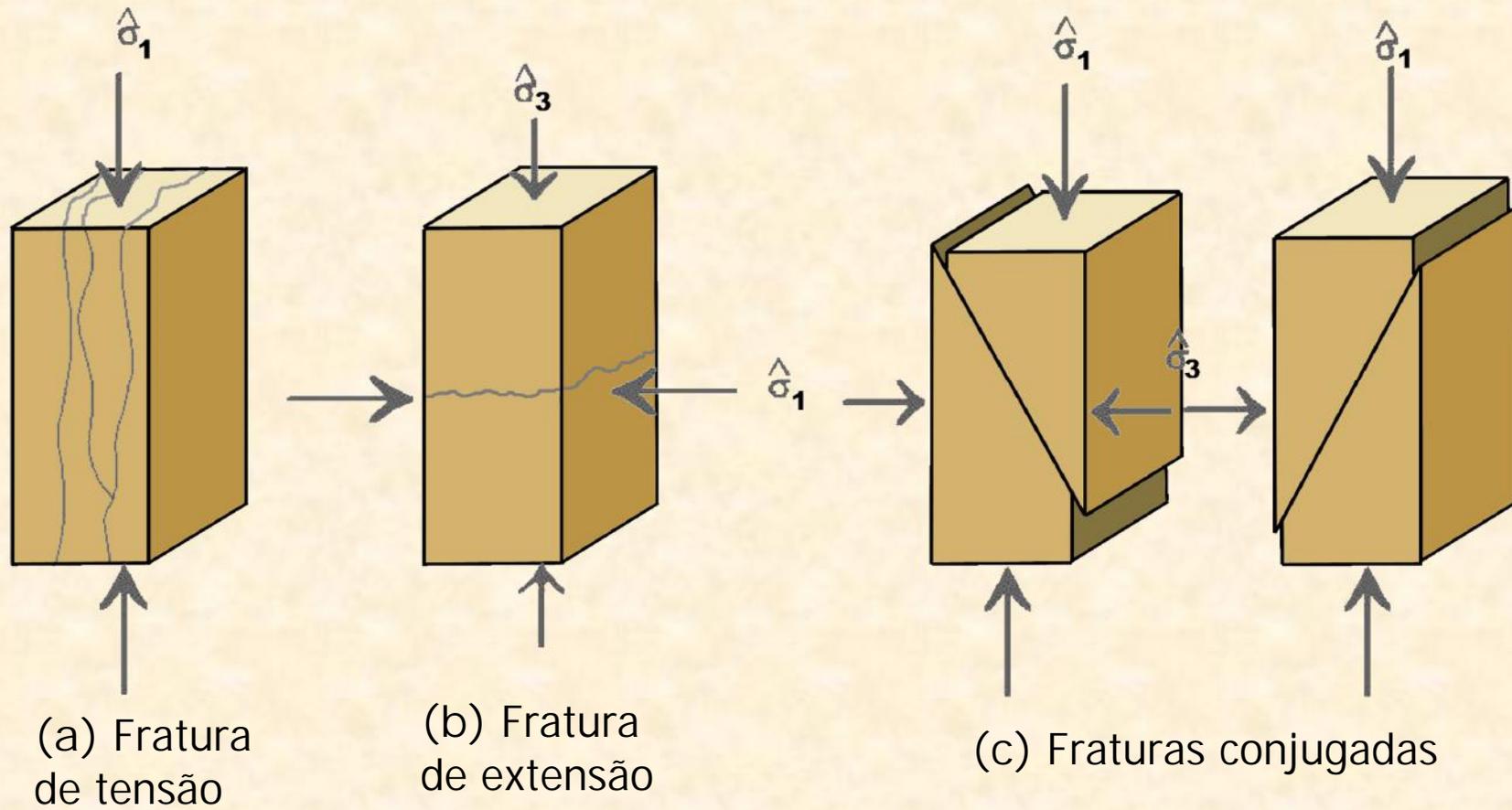
Métodos de estudo

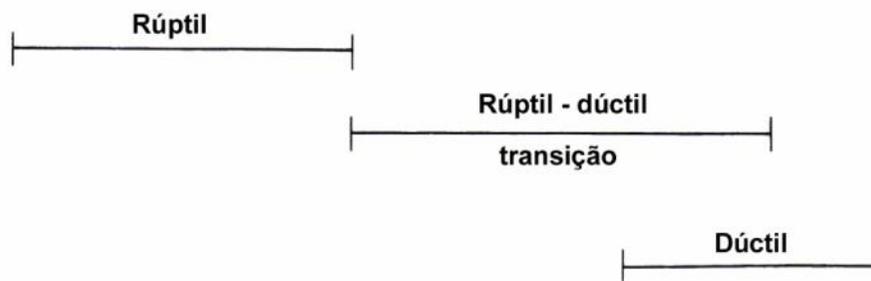
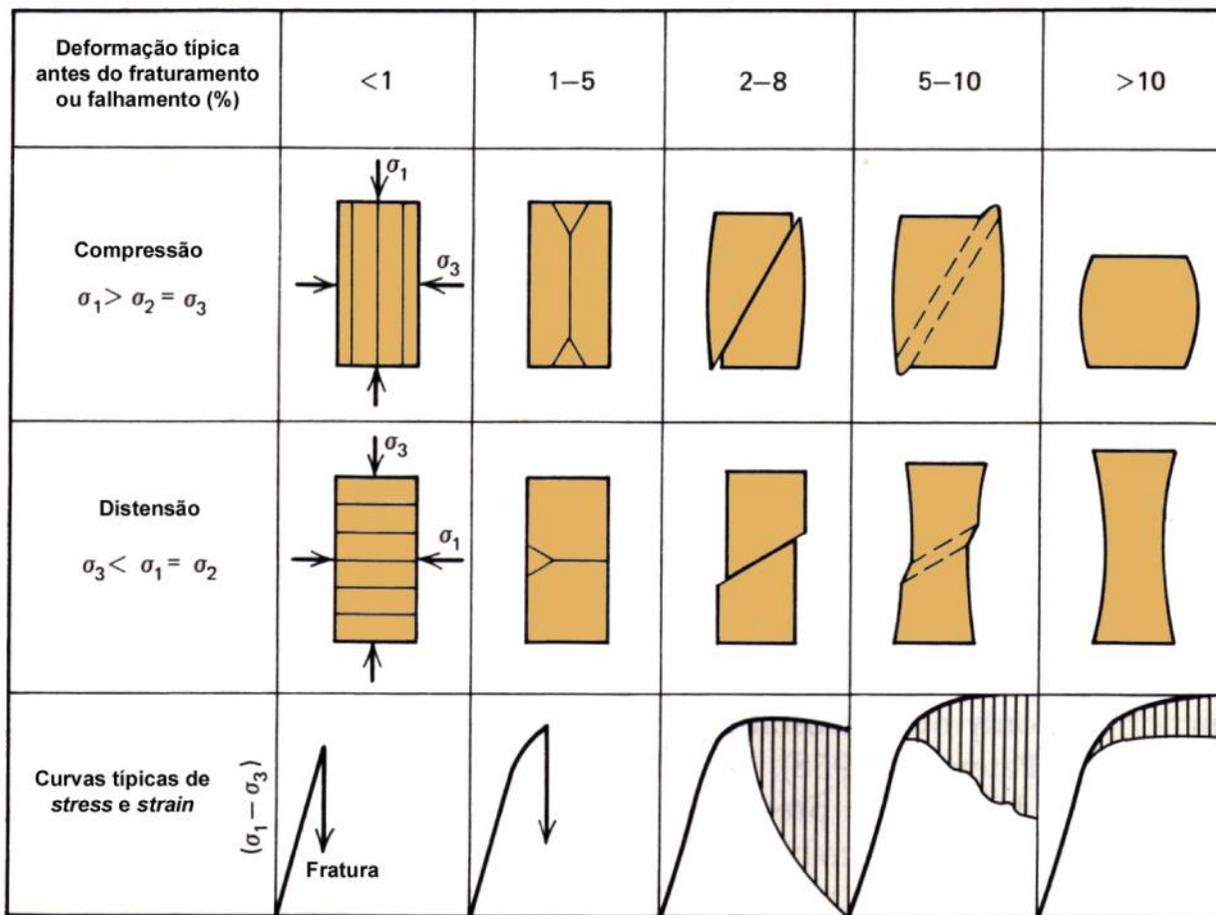
- Dinâmico: investiga a natureza e os tipos de tensões aplicadas durante a deformação.
- Cinemático: as relações geométricas e de simetria em relação a um plano de movimento são estabelecidas na análise da trama rochosa.
- Analítico: ensaios laboratoriais teóricos de resistência de materiais, similares àqueles aplicados em metais, cerâmica e concreto.
- Modelos Reduzidos: teste de deformação em modelos, com o objetivo de se descobrir as tensões regionais envolvidas.

A resposta da rocha à uma dada deformação



Tipos de fraturas desenvolvidas durante experimentos em rocha em estado rúptil





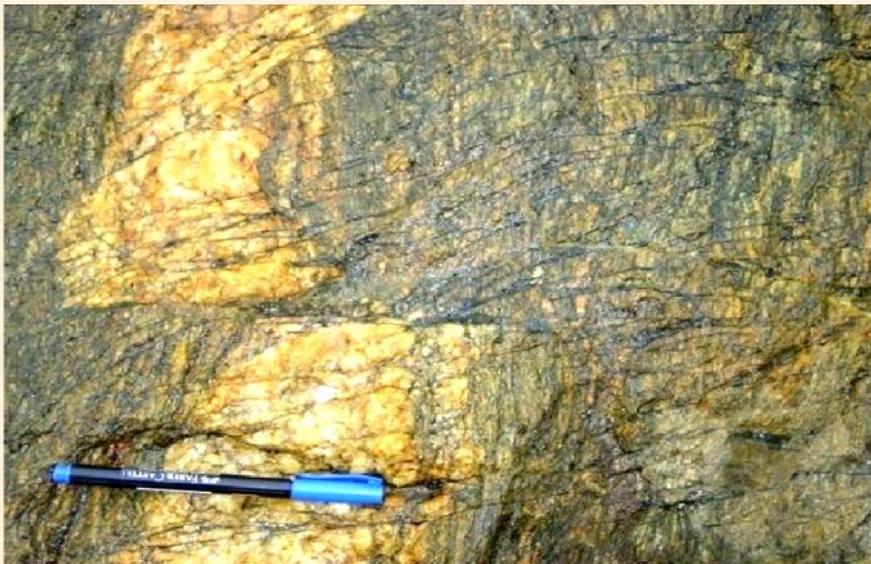
Evolução da
deformação de acordo
com:

(a) propriedades
reológicas da rocha
(b) aumento
gradativo do esforço
(stress).

(Hobbs, Means e
Williams, 1976)

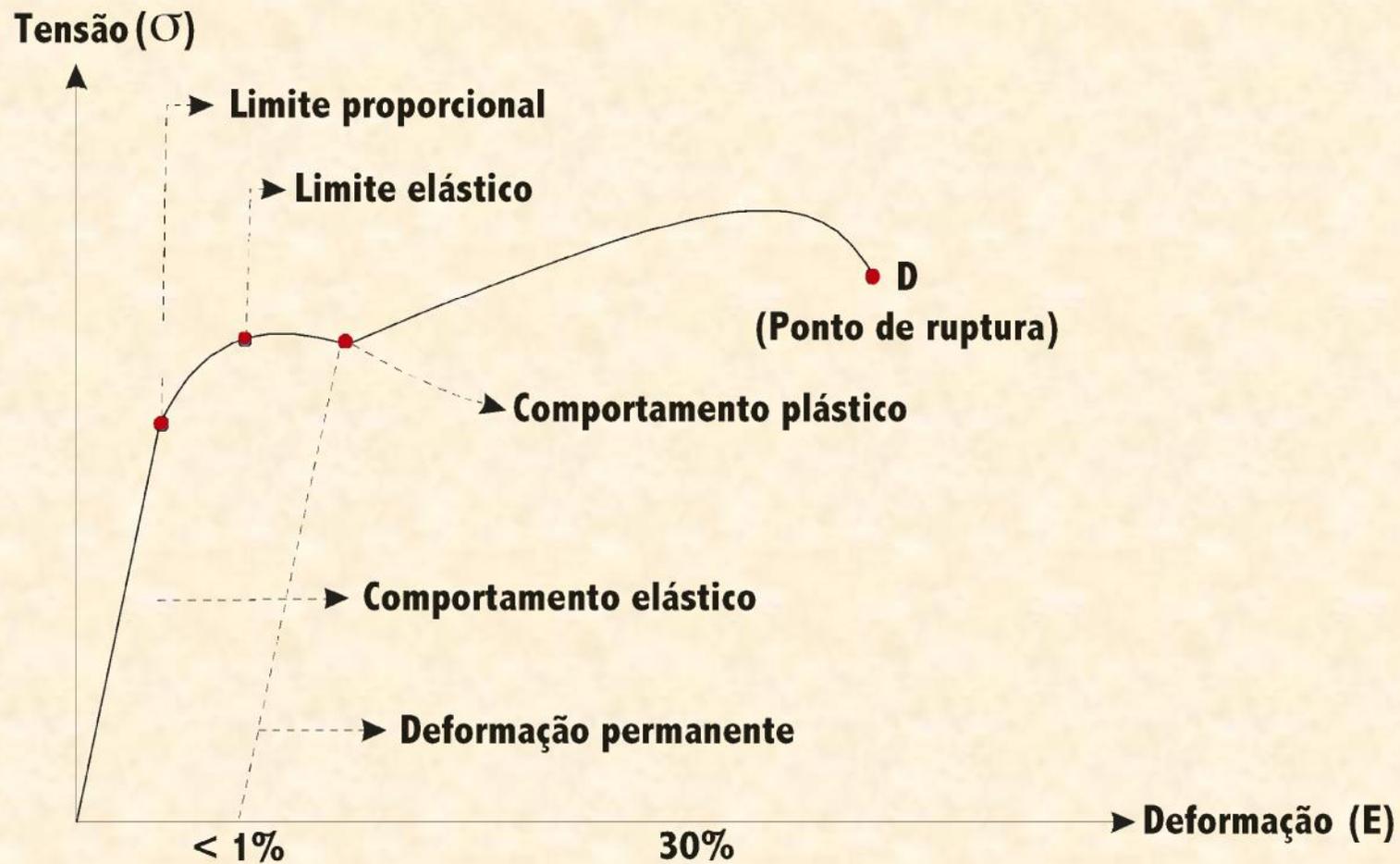
Gráfico Tensão x Deformação

- Uma rocha apresenta variação de sua deformação em função dos fatores intrínsecos e extrínsecos podendo posicionar-se de maneira variável no gráfico TENSÃO x DEFORMAÇÃO.
- No gráfico são demonstrados os campos referentes à deformação elástica, limite da elasticidade, deformação plástica e o ponto de ruptura.
- A curva de deformação é consequência das mudanças dos mecanismos da deformação ativadas em escala cristalina.



Gnaiss do Terreno
Paranaguá, Ilha do Mel
(PR). Foto: E. Salamuni

Gráfico TENSÃO x DEFORMAÇÃO: mostra de maneira genérica os limites reológicos teóricos de uma rocha



Fatores reológicos extrínsecos

(a) Pressão confinante: materiais rígidos tornam-se mais dúcteis, quando a pressão confinante (PC) é maior.

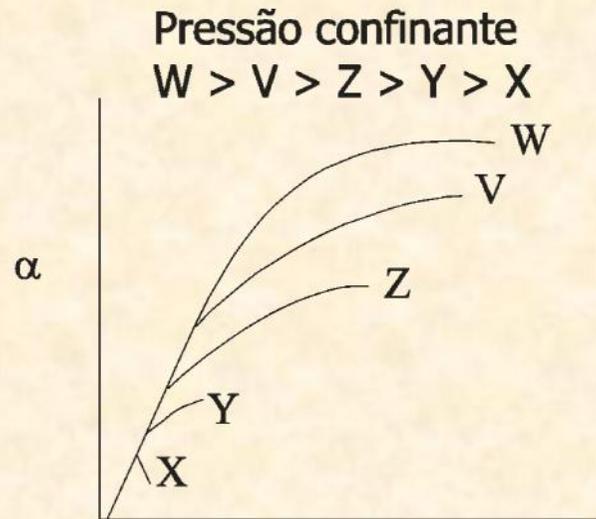
Os limites de elasticidade, resistência e esforço máximo se elevam com o aumento da PC: à maiores profundidades maiores esforços são necessários para produzir a mesma deformação.

(b) Temperatura: facilita a deformação, tornando os materiais mais dúcteis, principalmente quando a pressão confinante e a temperatura somam seus efeitos.

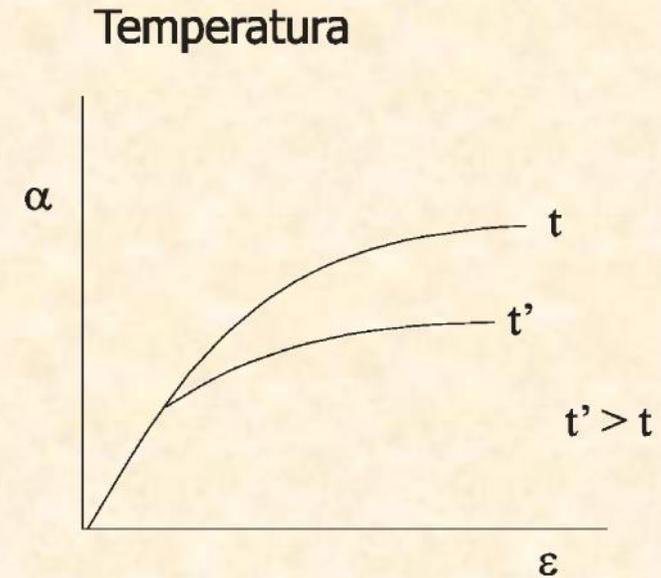
O limite da resistência, o esforço máximo e o limite de elasticidade, diminuem com o aumento de temperatura: a mesma deformação é causada por esforços, tanto menores, quanto maior for a temperatura, que age inversamente em relação à pressão confinante.

(c) Tempo de Aplicação do Esforço: se faz lentamente e com pausas - fenômeno comum na natureza – por meio de acréscimos infinitesimais.

Quanto maior o tempo de aplicação do esforço mais dúctil será a deformação.

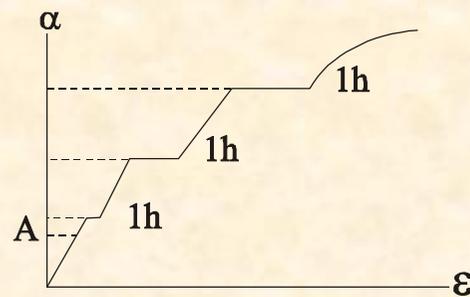


- a) Materiais friáveis tornam-se dúcteis;
- b) Aumenta o limite de elasticidade, limite de resistência máximo;
- c) Aumenta o ângulo de cisalhamentos com o eixo do corpo de prova.

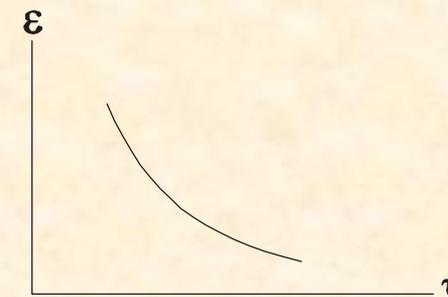


- a) Facilita a deformação;
- b) Diminui o limite de resistência, o esforço máximo e o limite de elasticidade.

Tempo de aplicação do esforço

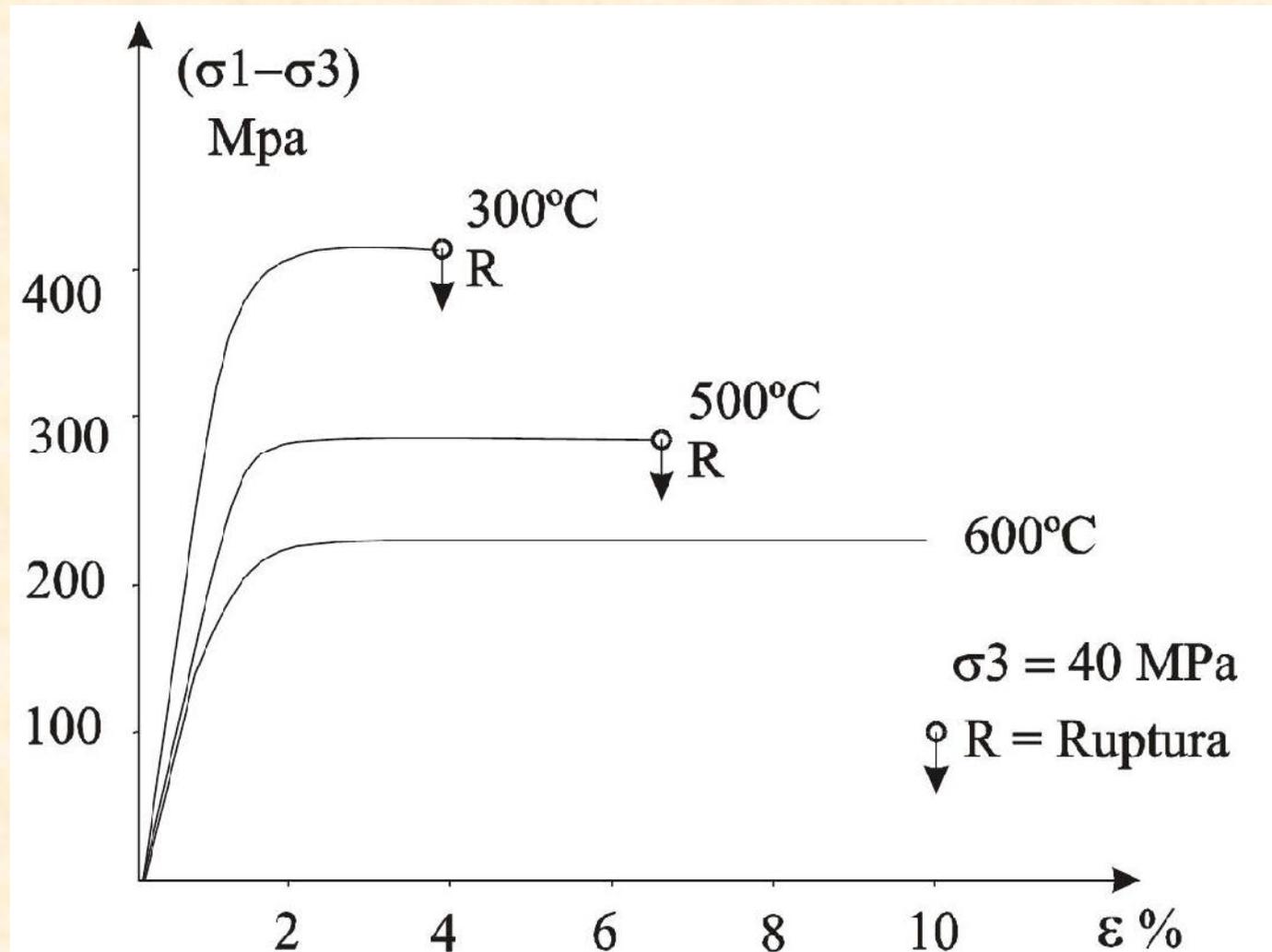


Aplicação do esforço com pausas de 1 hora

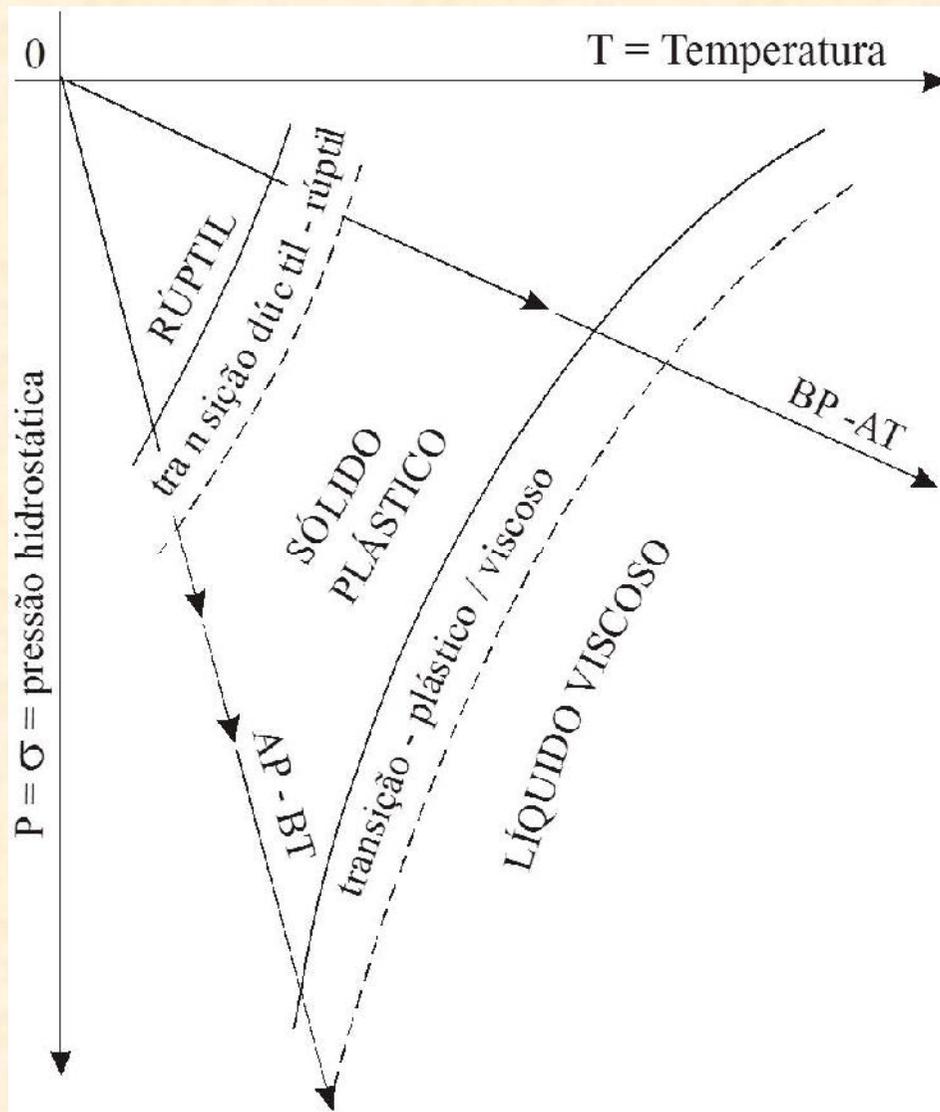


A deformação diminui exponencialmente com o tempo

Deformação sob pressão confinante e temperatura variável



Fonte: Decifrando a Terra



Domínios de deformação em função da pressão hidrostática / litostática e temperatura.

As linhas BP – AT representam o comportamento esperado em regimes de alto e baixo gradientes térmicos, respectivamente.

AP = alta pressão

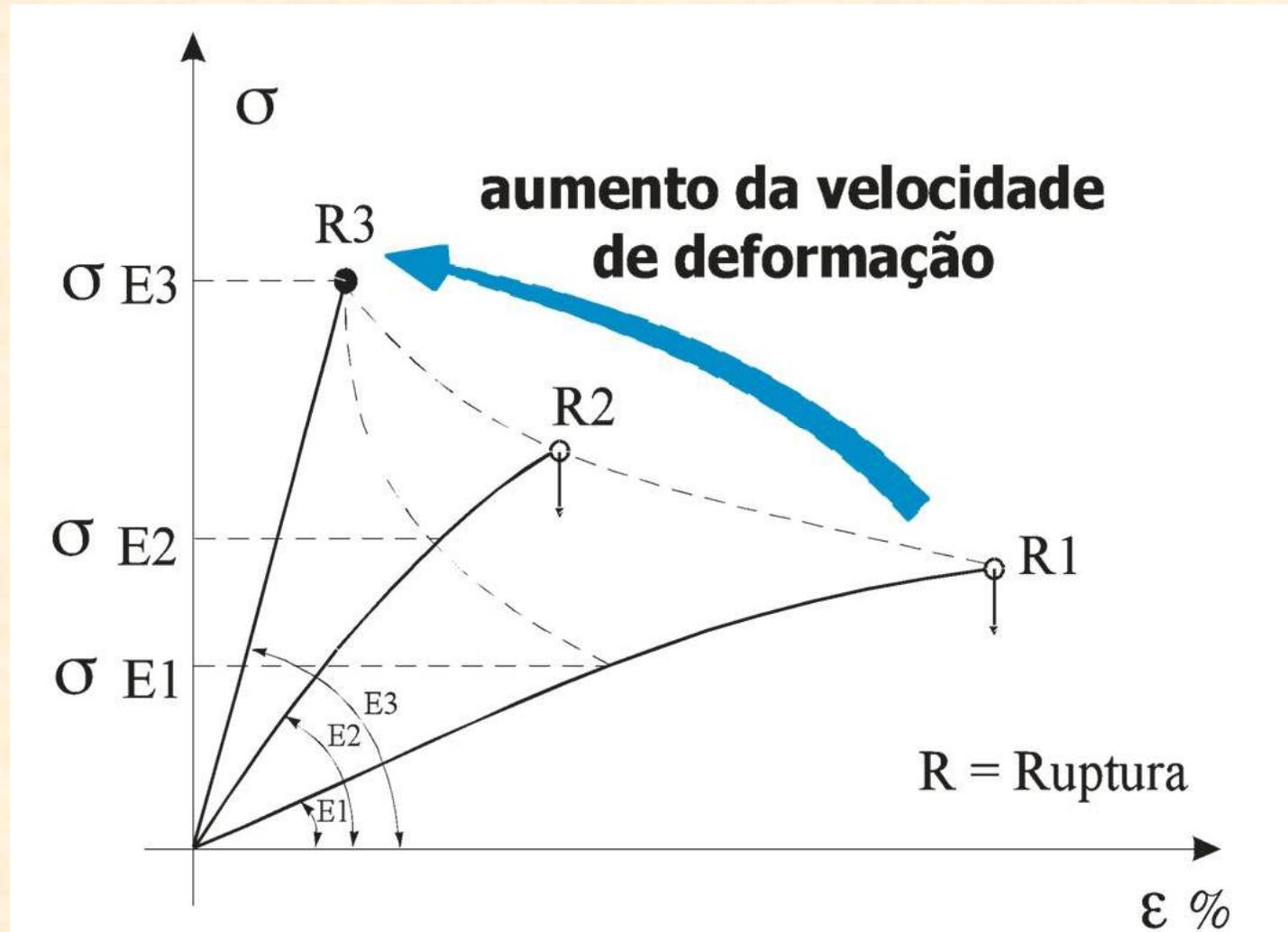
BP = baixa pressão

AT = alta temperatura

BT = baixa temperatura

Fonte: Decifrando a Terra

Deformação sob condições de velocidade e deformação variáveis



Fonte: Decifrando a Terra

Fatores reológicos intrínsecos

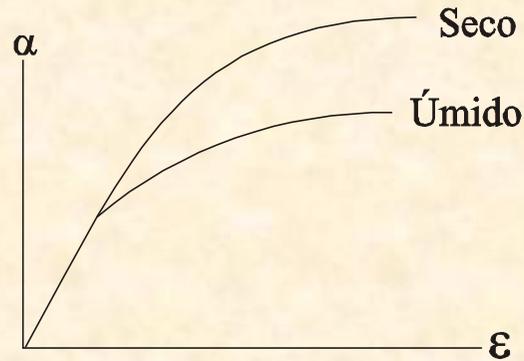
(d) Presença de Fluidos: o limite de plasticidade, o limite de resistência e o esforço máximo, diminuem com a presença das soluções (uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções).

(e) Anisotropia Estrutural: corpos de provas, cortados paralela ou perpendicularmente à xistosidade, mostram comportamentos diferentes (a orientação da anisotropia estrutural influi na deformação).

(f) Heterogeneidade litológica: devido à diferenças reológicas entre materiais, as rochas podem apresentar, em um mesmo evento de deformação, estruturas diferenciadas, principalmente quando há porções competentes e incompetentes.

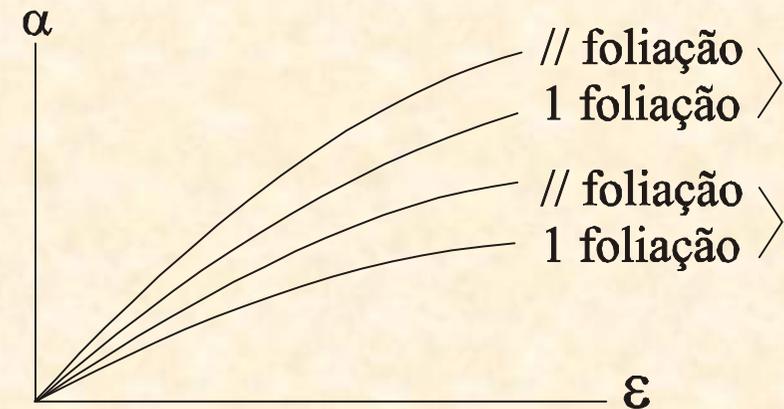
Willis (1932) introduziu o conceito de competência: rochas incompetentes são aquelas que se deformam sem se romperem e transmitem os esforços por distâncias maiores em função da ductibilidade; rochas competentes são relacionadas à deformação rúptil e fraturam com mais facilidade. Neste caso os esforços se propagam em curto alcance.

Influência da presença de líquidos

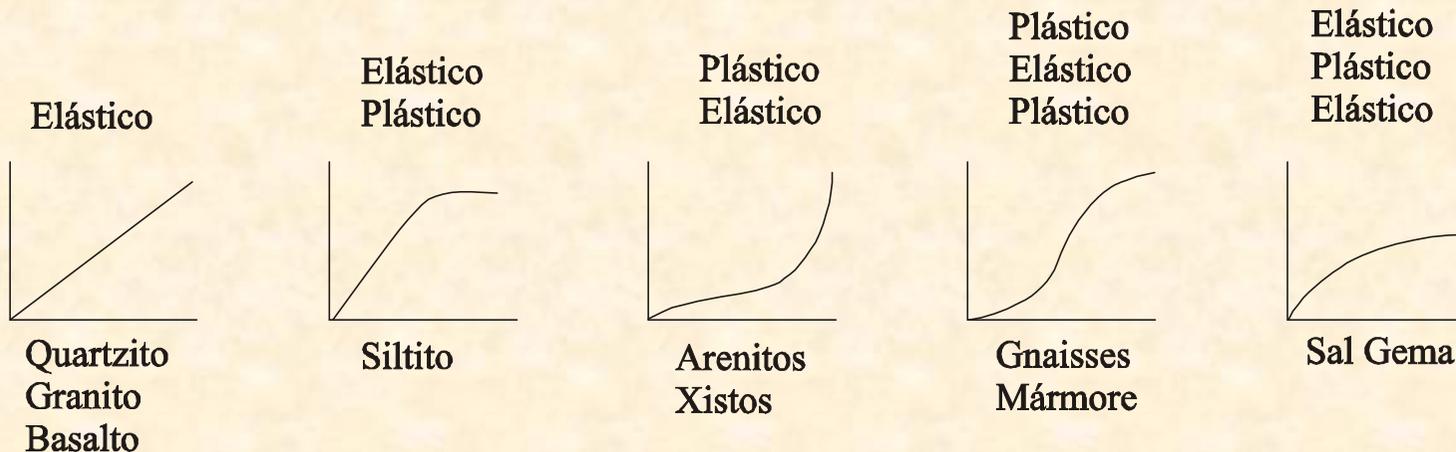


- Diminui o limite de resistência, de elasticidade e o esforço máximo;
- Uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções;
- Diferentes soluções produzem efeitos diferentes.

Anisotropia estrutural



Heterogeneidade litológica



CIRCULO DE MOHR

Diagrama ou círculo de Mohr

O círculo de Mohr é um método gráfico desenvolvido por Christian Otto Mohr que permite a representação do estado de tensões num ponto.

É uma representação cartesiana da tensão (τ), decomposta em grandezas vetoriais a partir de um corpo rochoso qualquer submetido à tensão.

Trata-se de técnica gráfica que mostra o estado de stress de diferentes planos em um mesmo campo de tensão. As tensões (τ_n normal e τ_s cisalhante) são marcadas em um plano como pontos simples, sendo τ_n medido no eixo horizontal e τ_s na vertical.

Valores de τ_n e τ_s

$$F = \tau \cdot A$$

$$\tau_n = 1/2 (\tau_1 + \tau_3) + 1/2 (\tau_1 - \tau_3) \cdot \cos 2\theta$$

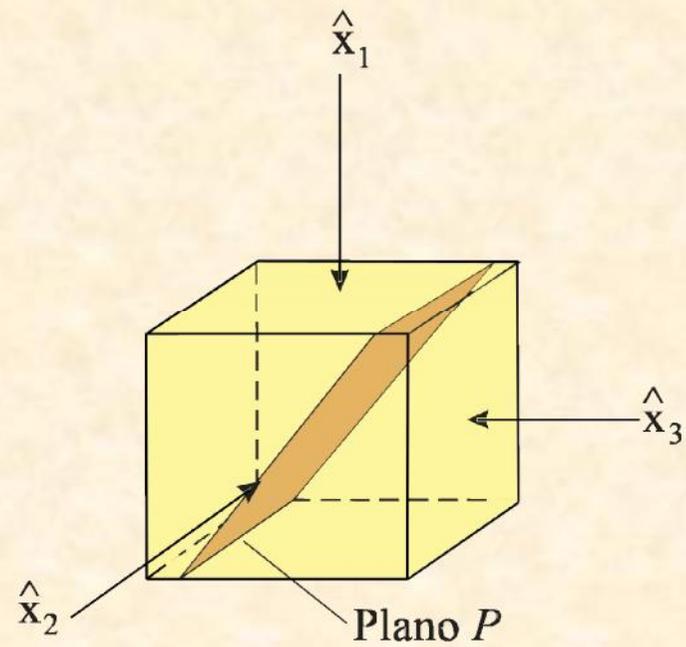
$$\tau_s = 1/2 (\tau_1 - \tau_3) \cdot \sin 2\theta$$

F = Força máxima aplicada pela pressão

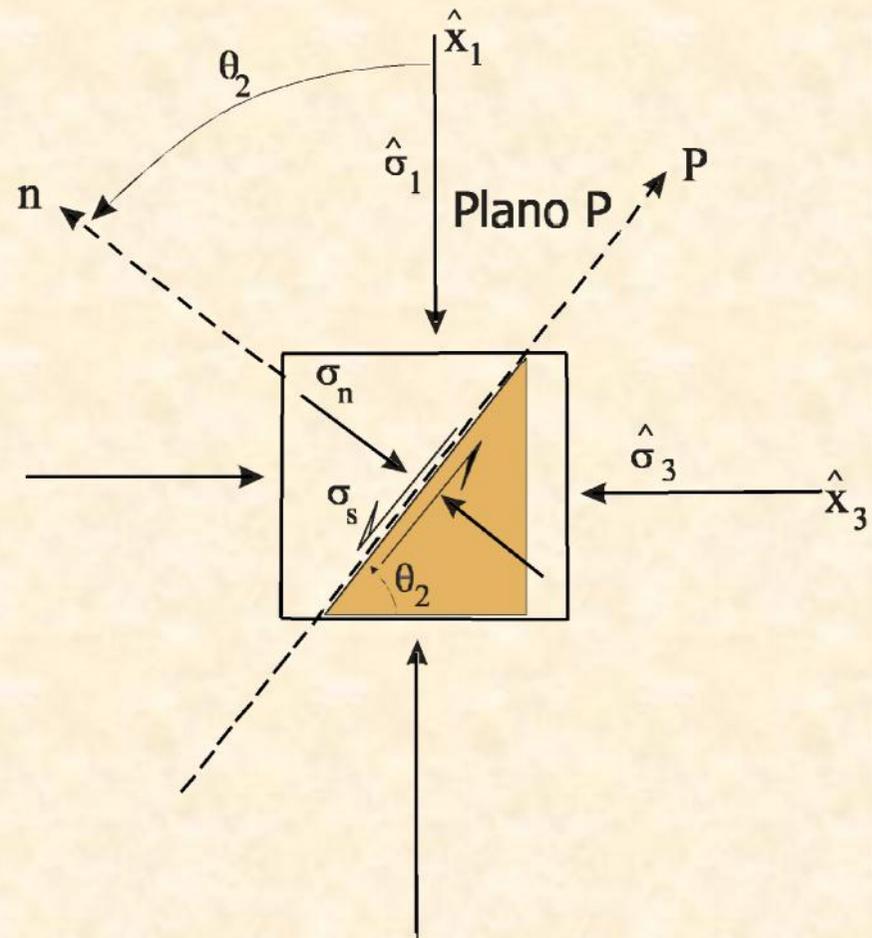
A = Área do plano arbitrado para o estudo

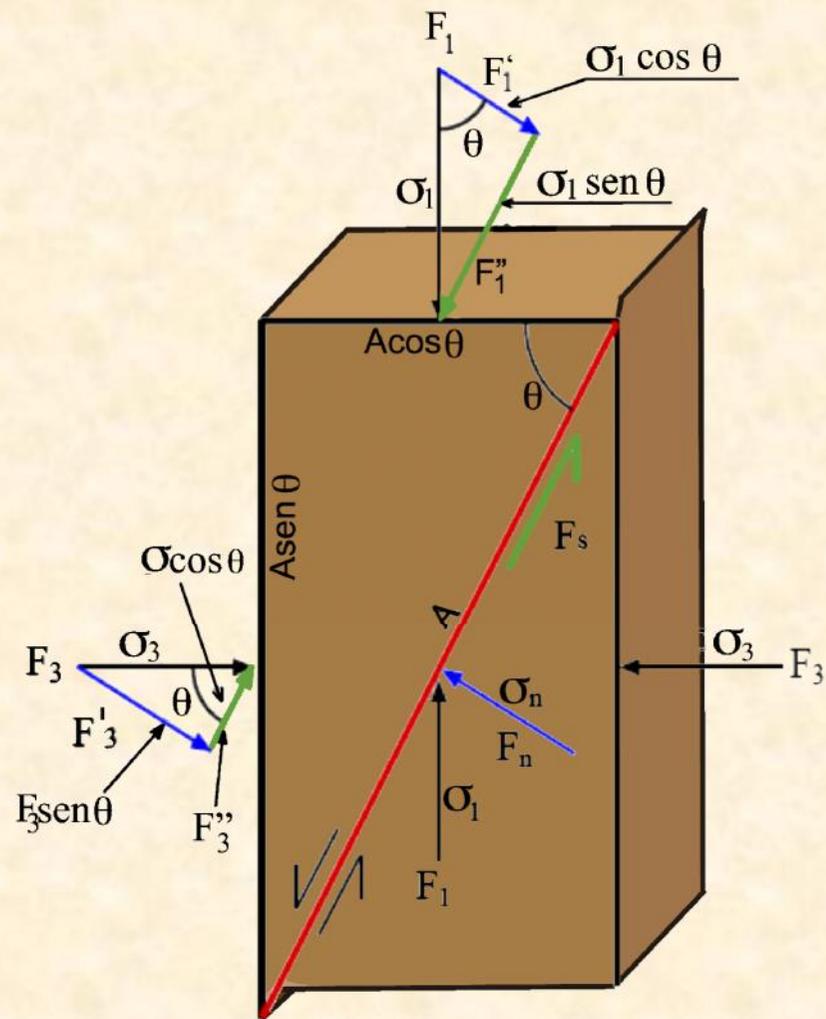
θ = Ângulo entre o plano arbitrado em relação à direção de Fz

σ = Tensão total

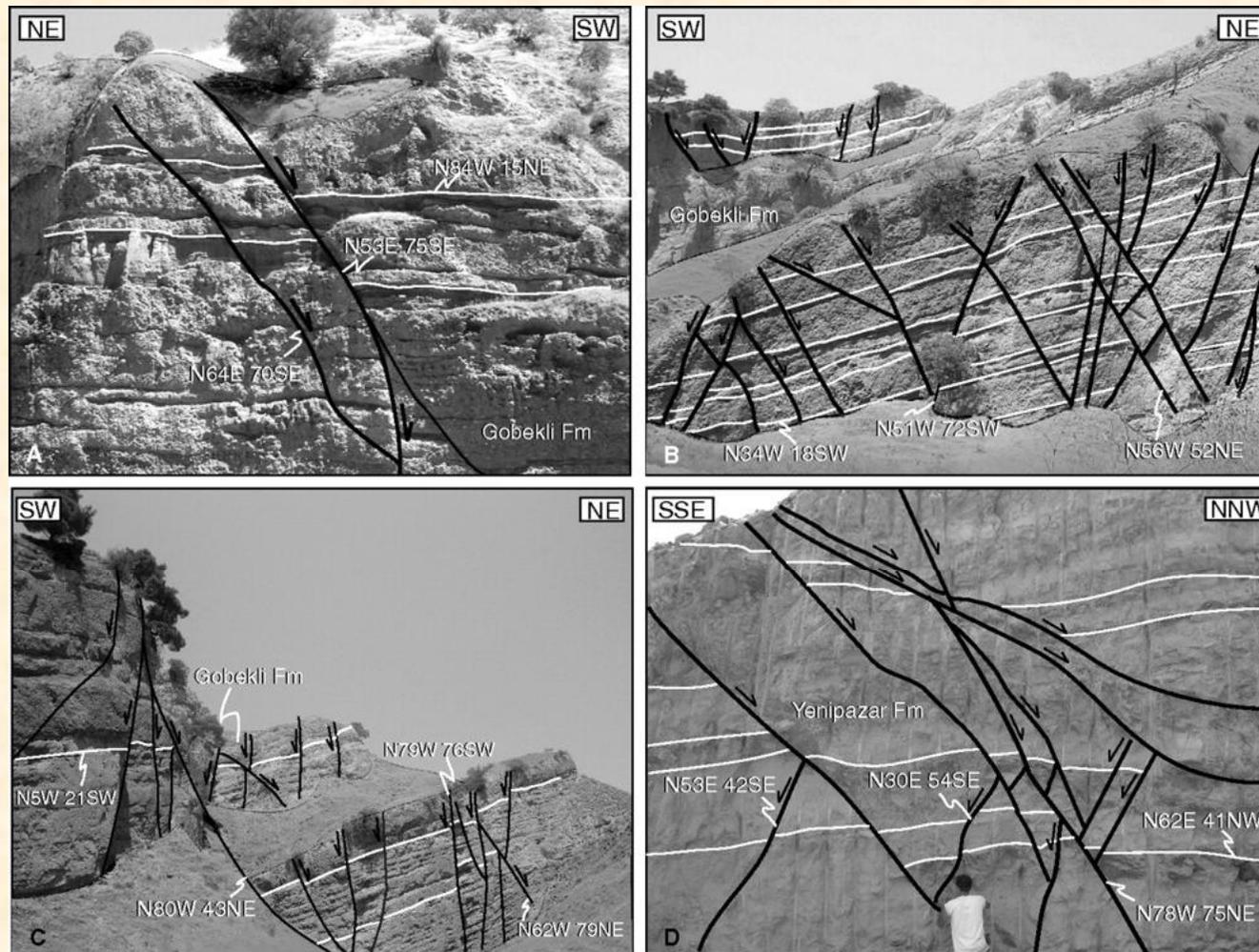


Componentes do STRESS



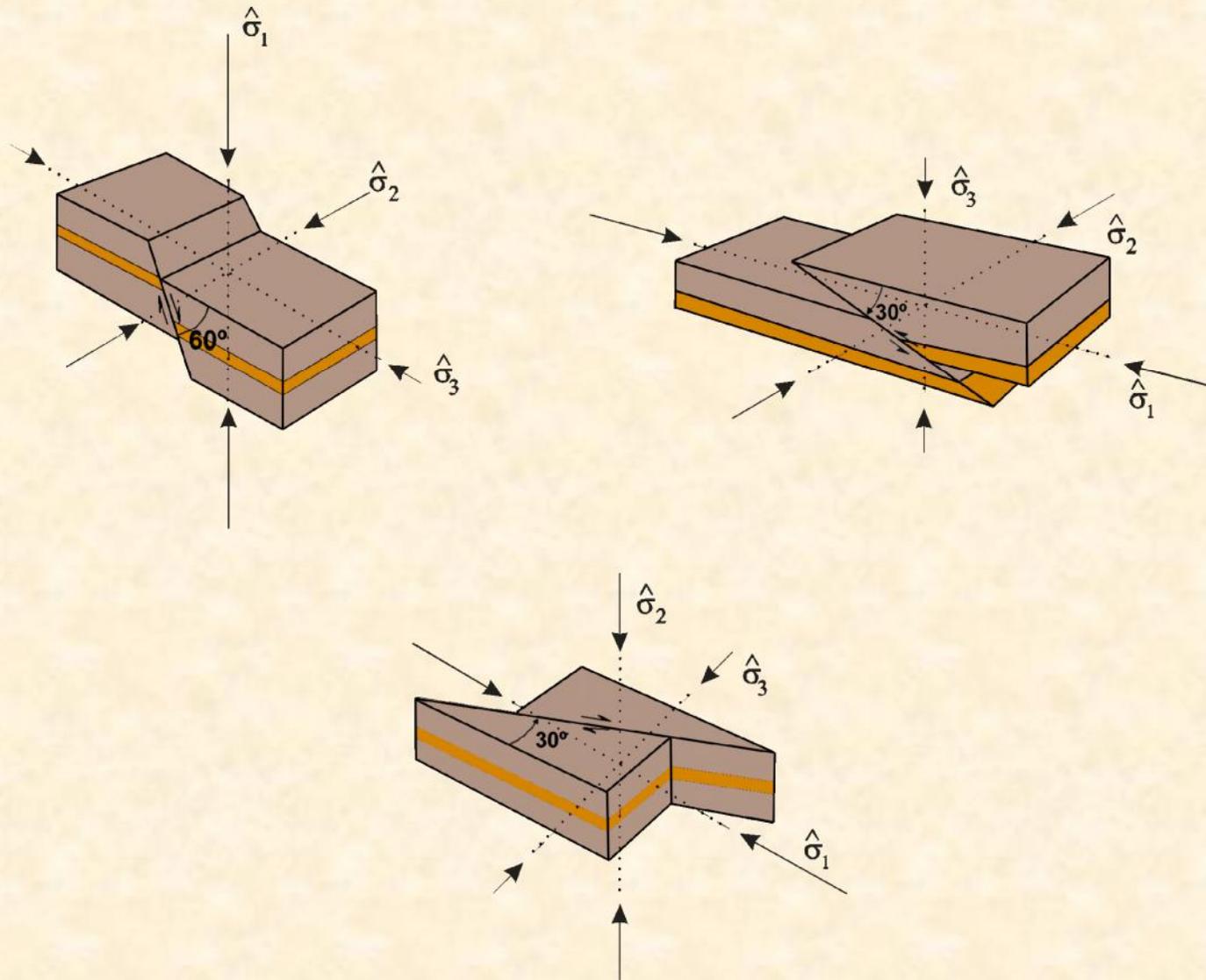


Fonte: www.geosurvey.state.co.org

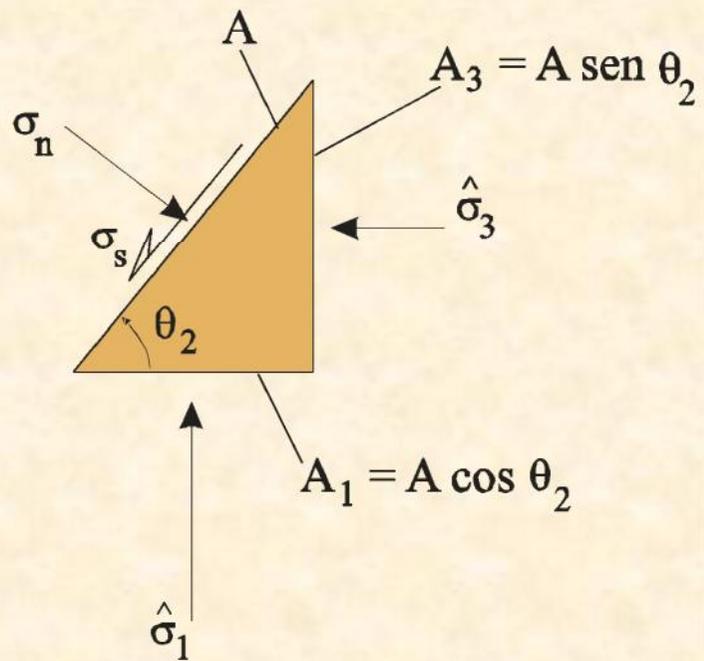


Exemplos de falhas normais que podem ser estudadas à luz do Círculo de Mohr. Fonte: www.gsabulletin.gsapubs.org

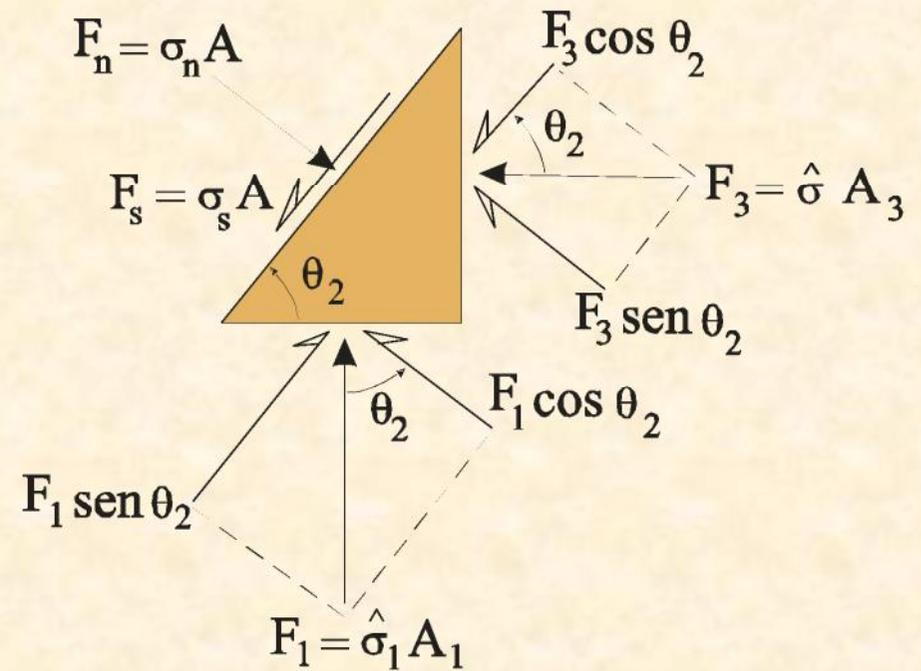
Modelo de falha (ou fratura) de Anderson (modelo andersoniano)



Componentes da TRAÇÃO



Componentes da FORÇA



-
- Visualmente o Círculo de Mohr indica que todos os estados de tensão possíveis no ponto P (ao longo de planos ou seções com inclinações quaisquer) estão sobre uma circunferência de raio R e centro medida no plano $\sigma - \tau$.
 - As tensões principais podem ser obtidas da representação gráfica do círculo de Mohr como sendo os pontos extremos da circunferência sobre o eixo das tensões normais, sendo calculadas como o centro \pm o raio.
 - As tensões tangenciais máximas podem ser calculadas como \pm o raio do círculo de Mohr correspondente.

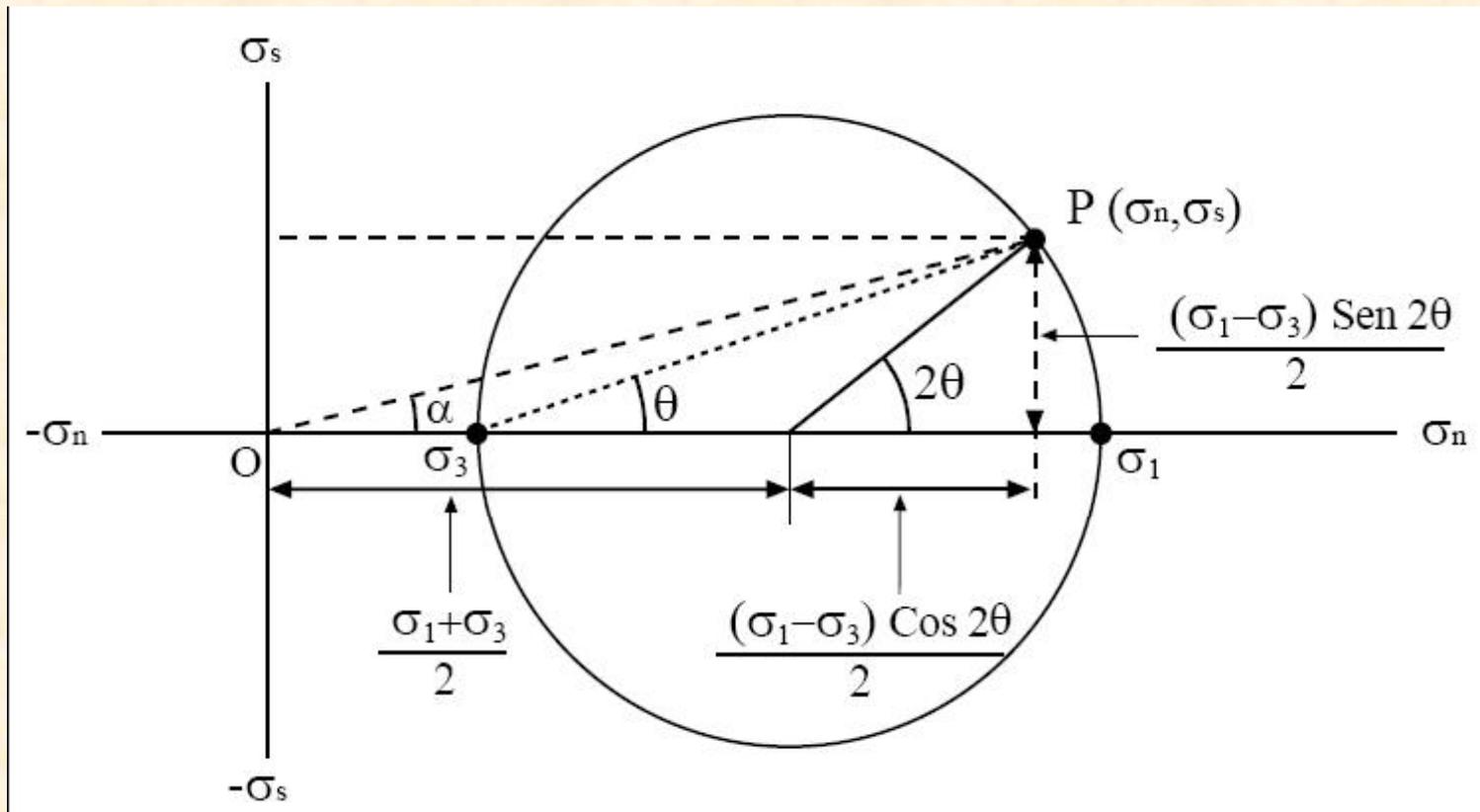
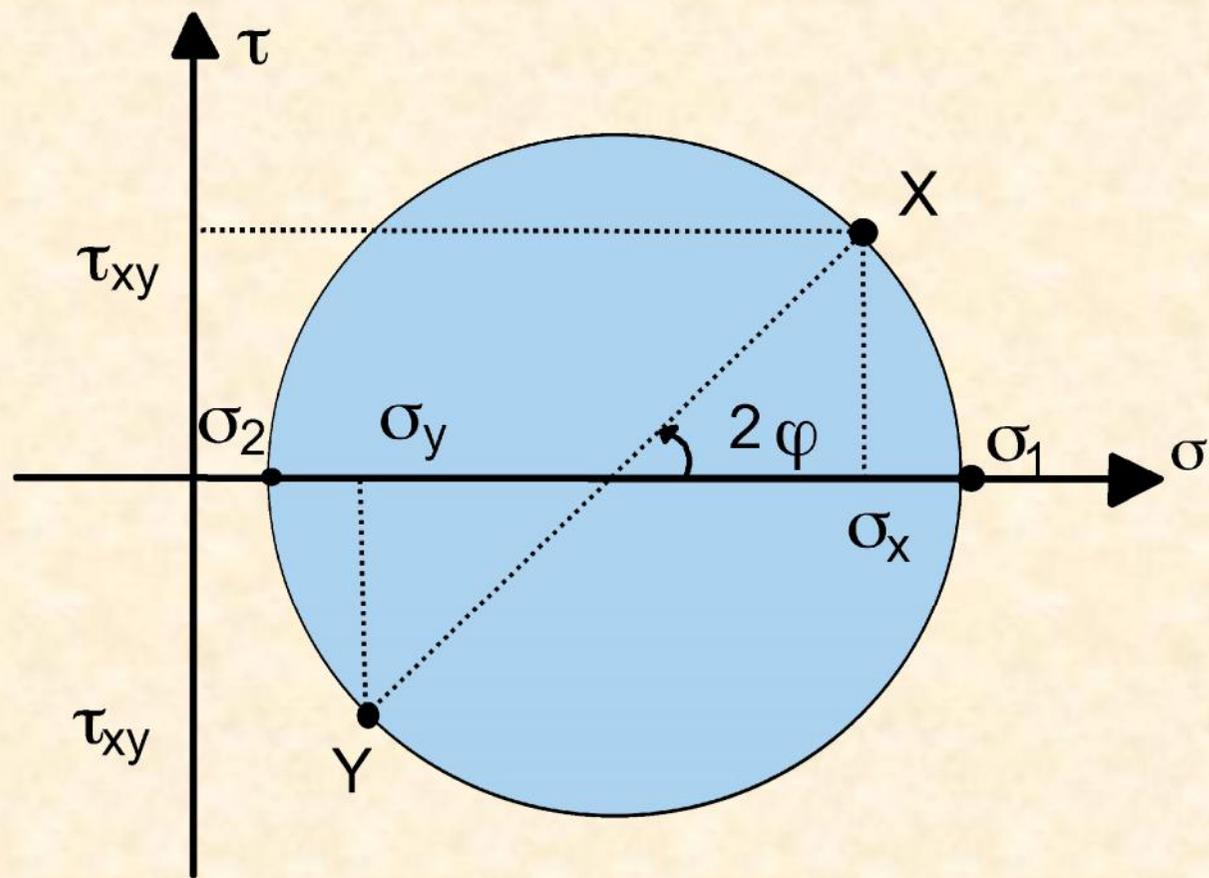
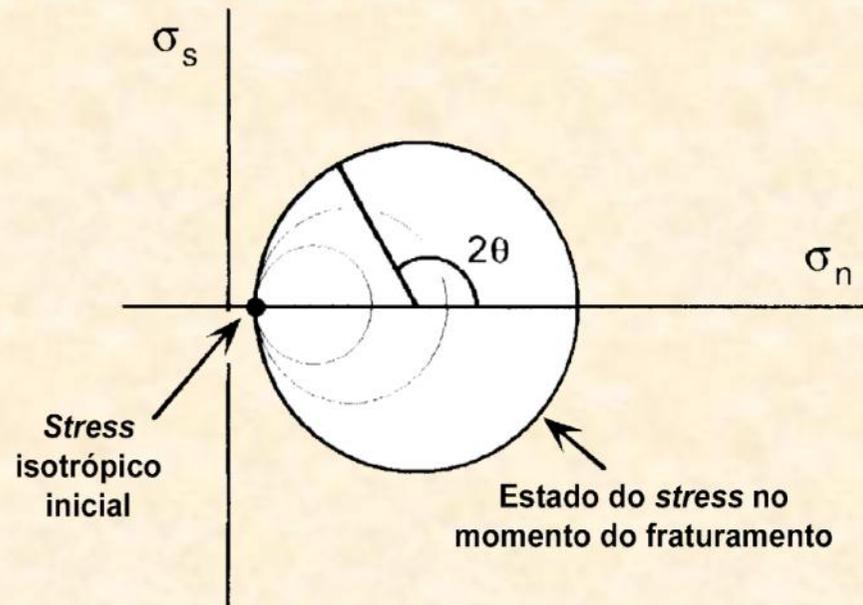
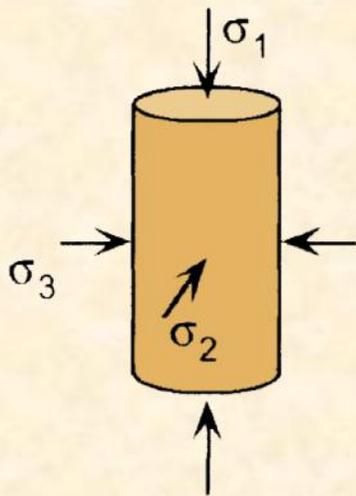
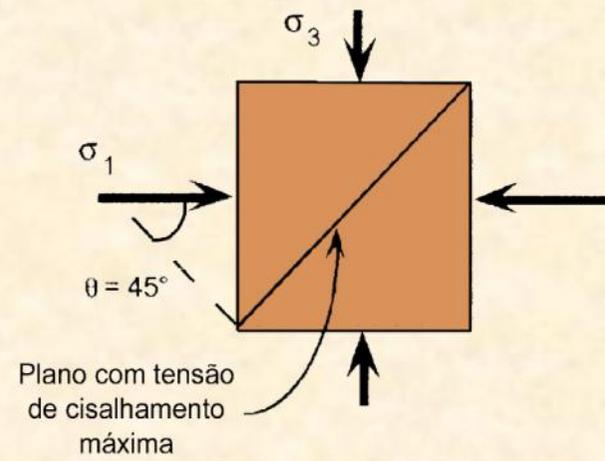
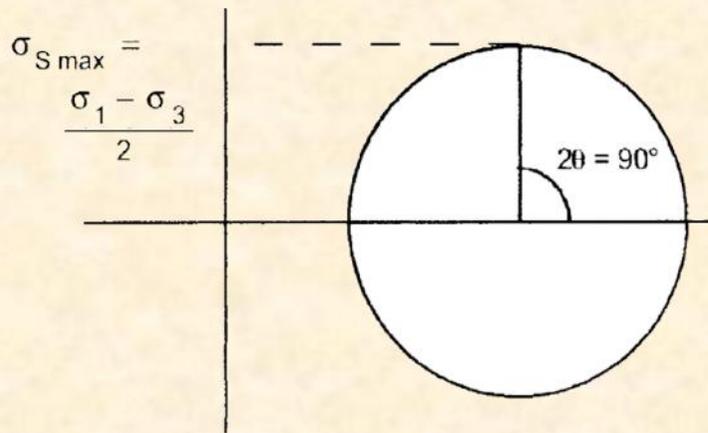
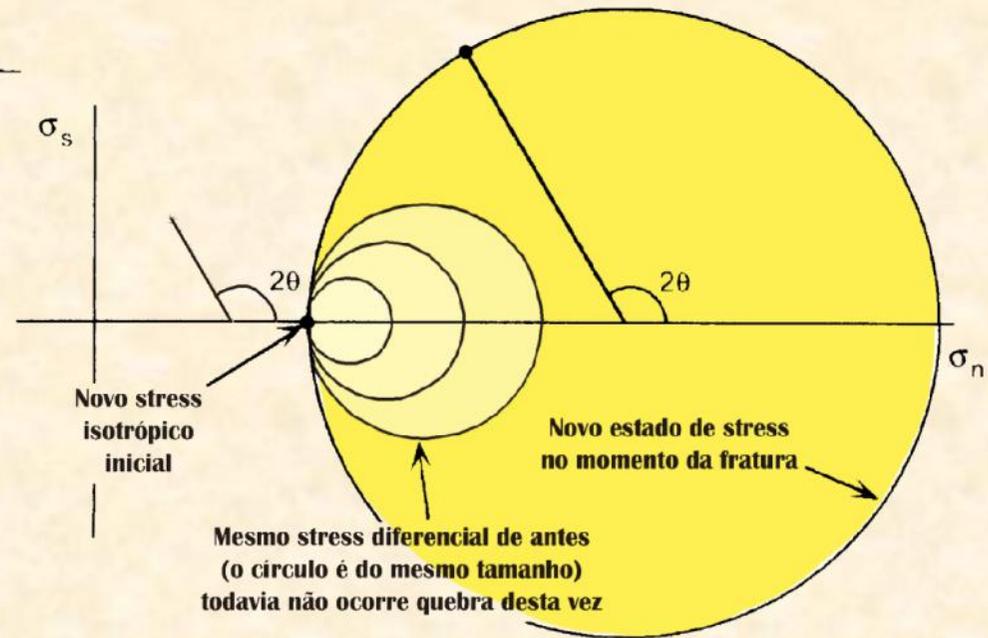
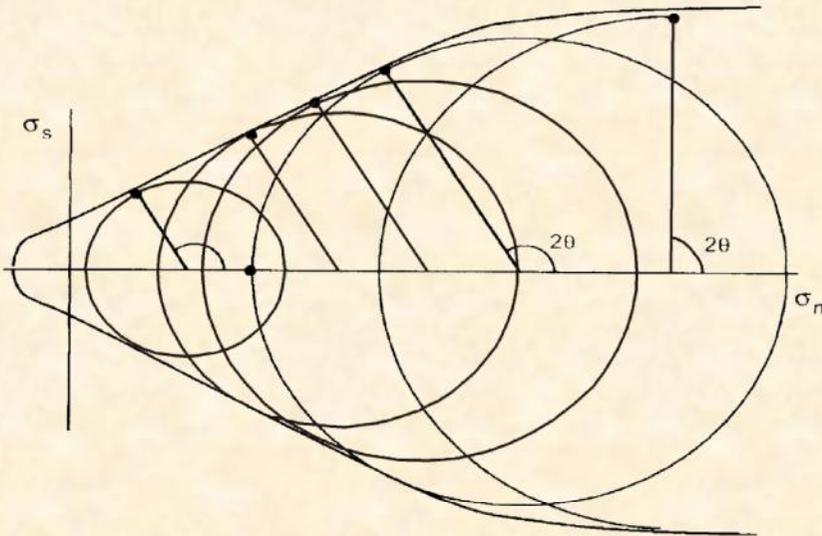


Diagrama ou círculo de Mohr. O ponto (P) representa um plano qualquer, orientado a um ângulo (θ) em relação a (σ_3)





Envelope ou Envoltória de Mohr



Exemplo de aplicação

