

# 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 ( $\tau_n$ ) e componente de cisalhamento ( $\tau_s$ ).

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 ( $\text{N/m}^2$ ) 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

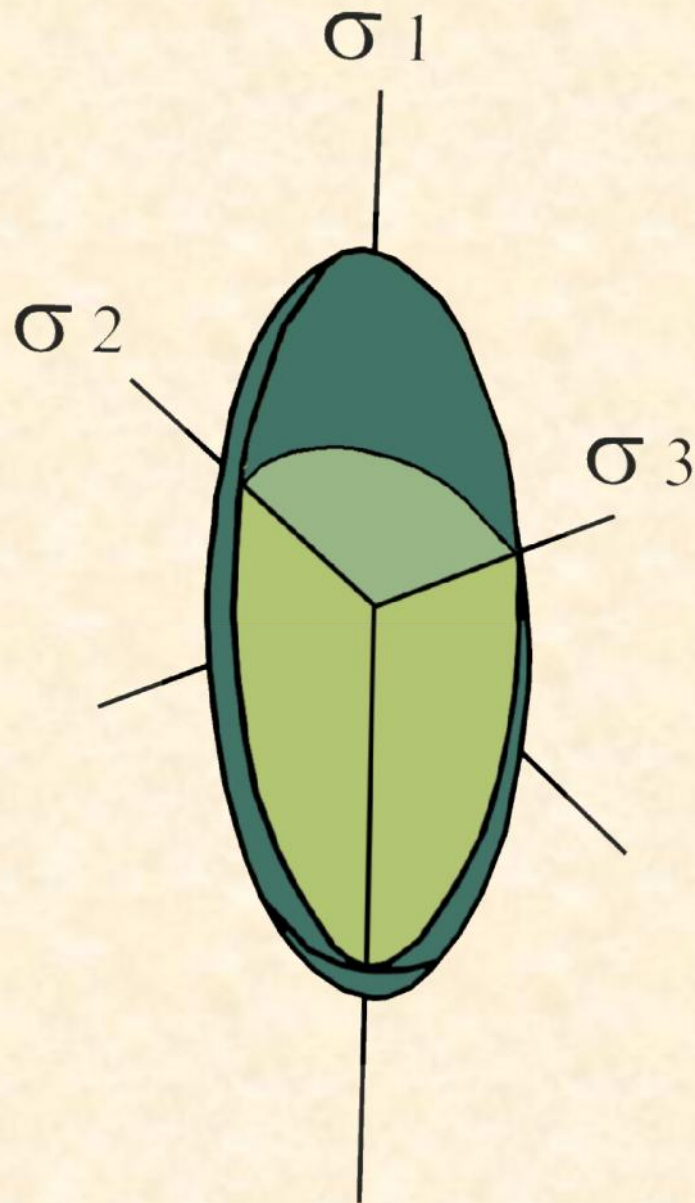
---

## 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  $\tau_1$  ( $S_{max}$ ) sempre é perpendicular a  $\tau_3$  ( $S_{min}$ ).

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



O campo de tensão é caracterizado pelos eixos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , cuja representação gráfica é o elipsóide de tensão.

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

---

## Elipsóide de deformação (strain)

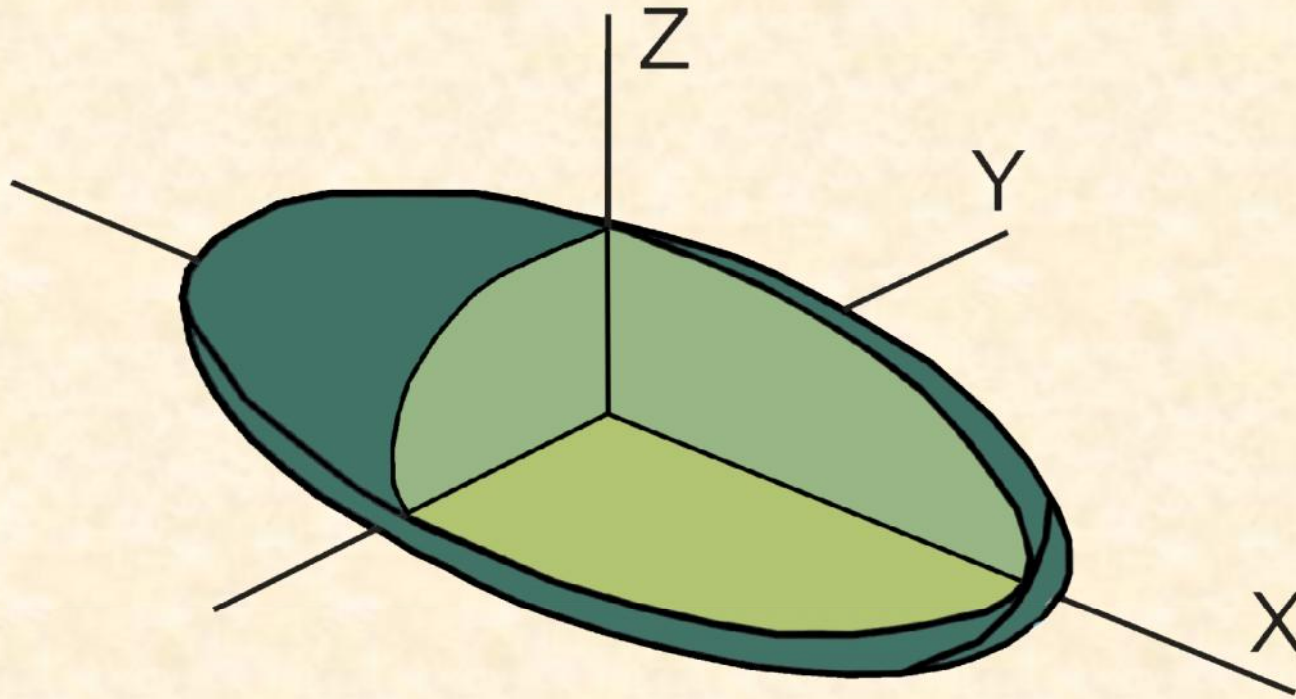
Eixos de deformação são representados pelas letras "x", "y", "z", cuja relação é  $x > y > z$ , ou seja, mostra ordem decrescente de deformação.

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,

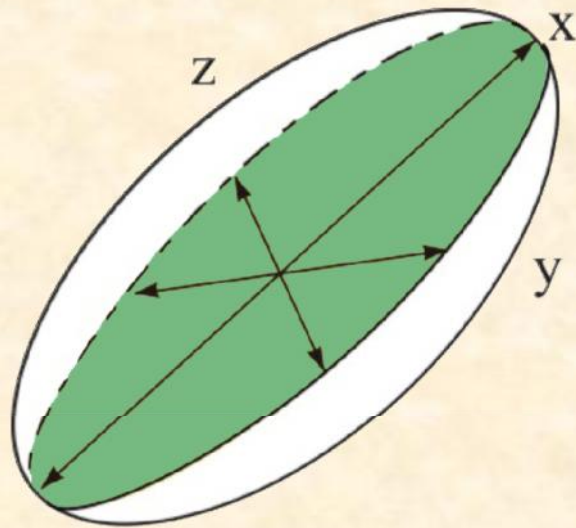
- (a) estiramento/encurtamento/encurtamento
- (b) estiramento/encurtamento/estiramento
- (c) encurtamento/estiramento/estiramento



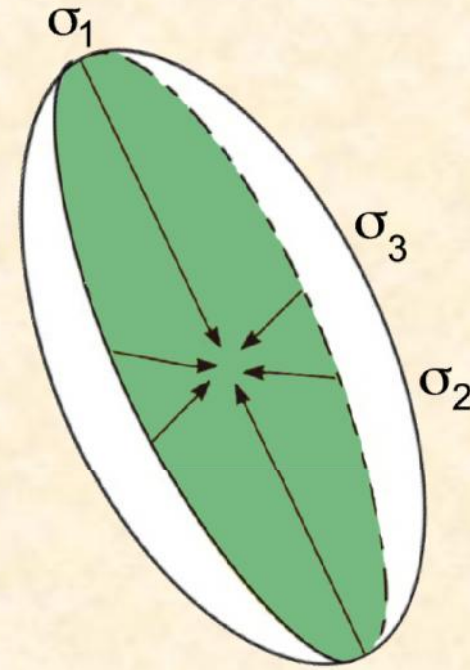
O campo de deformação é caracterizado pelos eixos X,Y,Z cuja representação gráfica é o elipsóide de deformação.

(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.

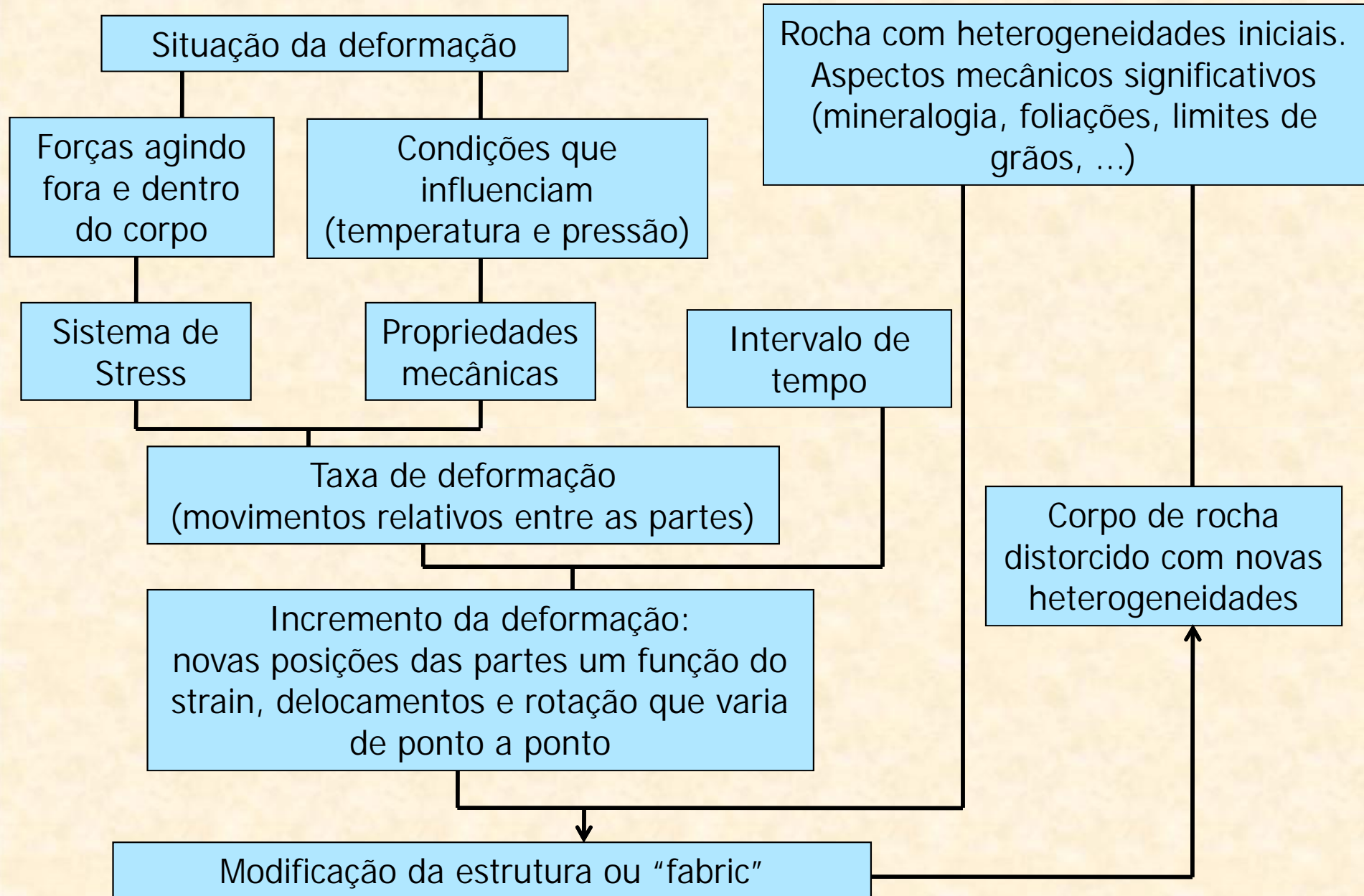
Foto: E. Salamuni

---

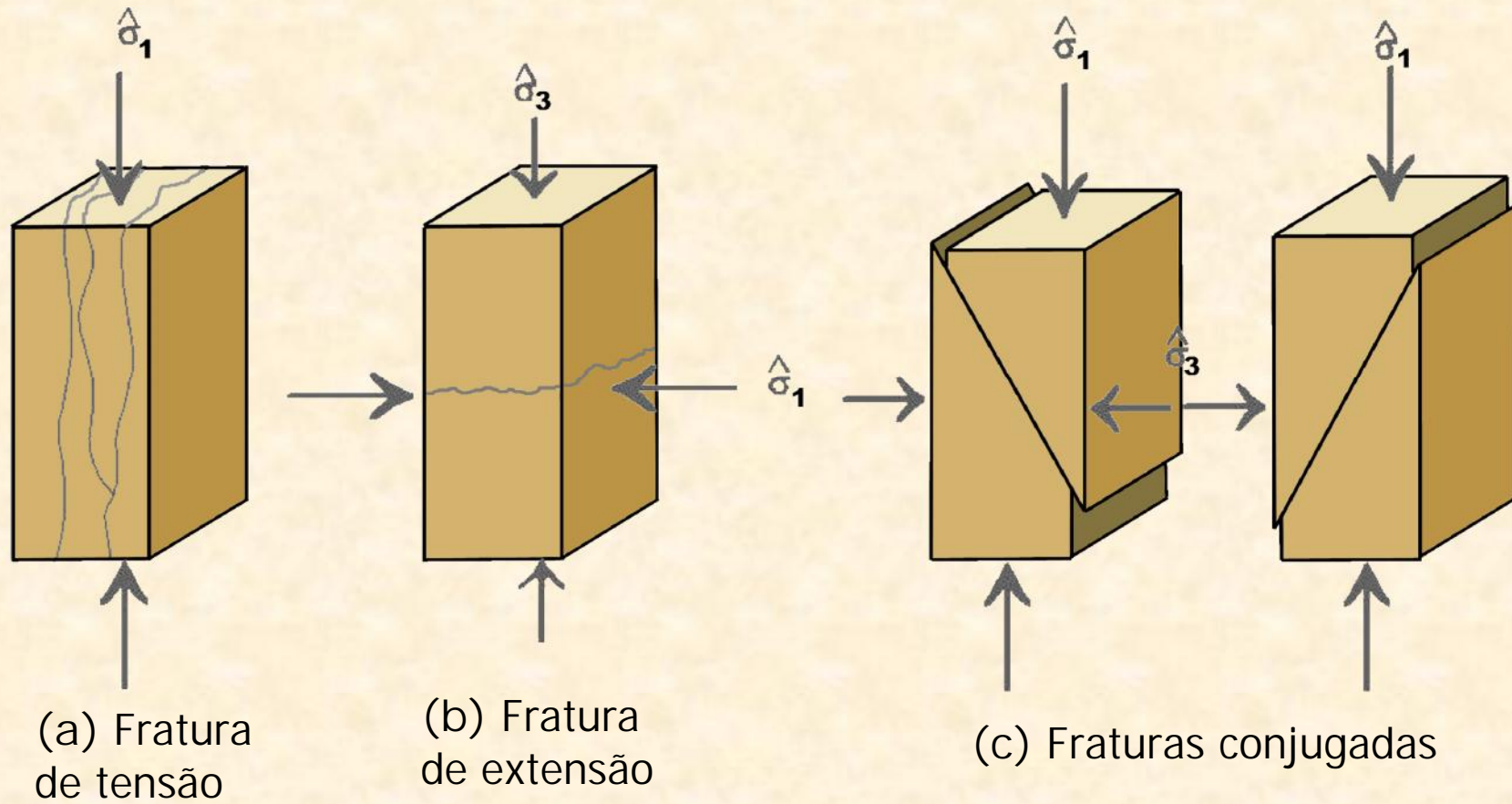
## Métodos de estudo

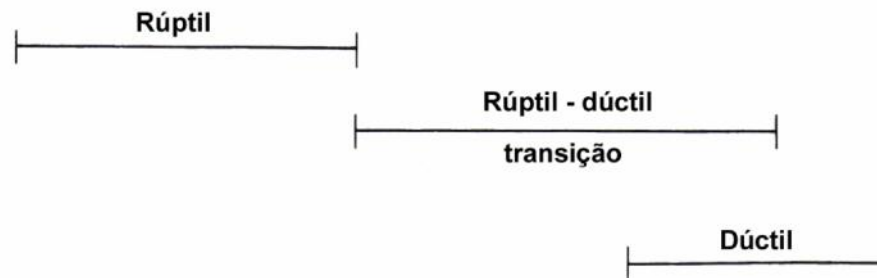
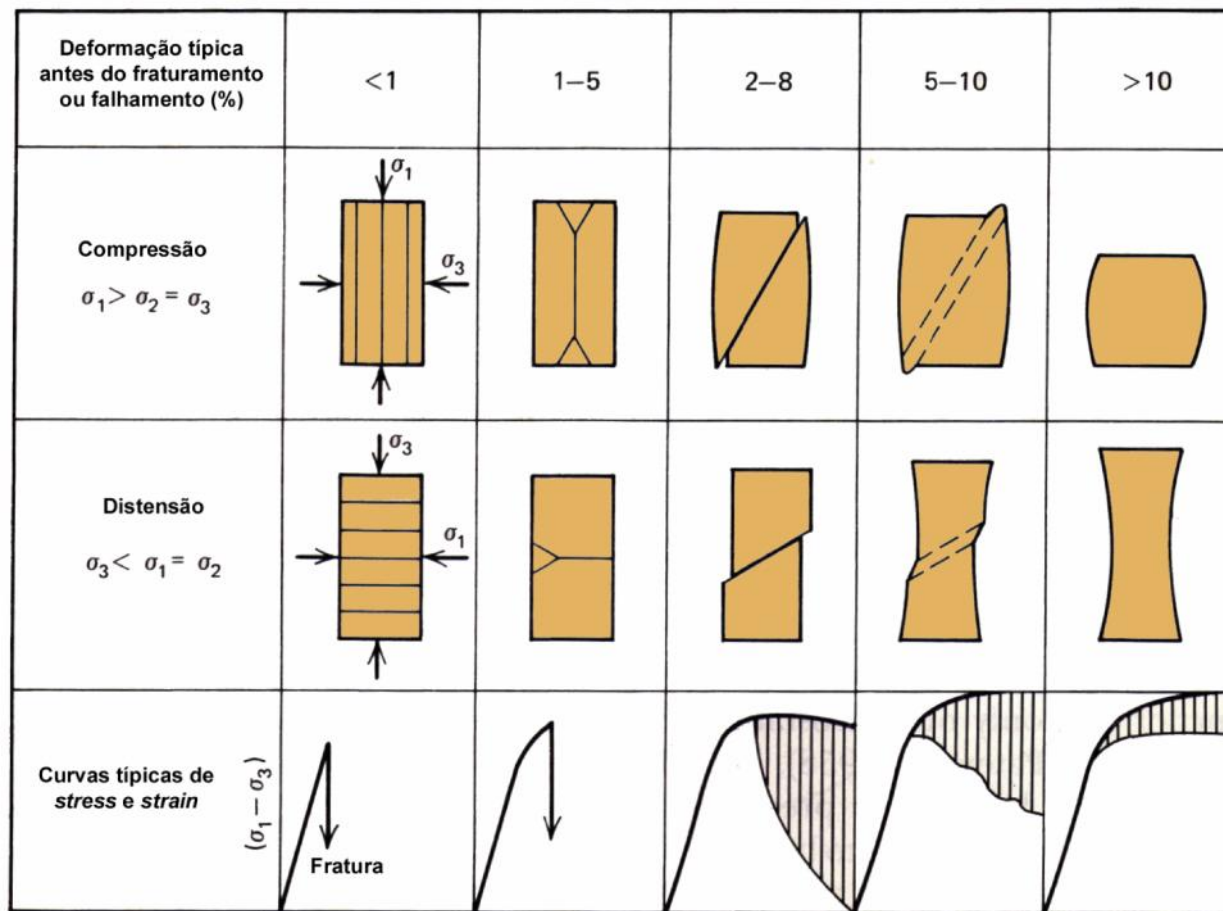
- Dinâmico: investiga a natureza e os tipos de tensões aplicadas durante a deformação.
- Cinemático: as relações geométricas e de simetria em relação a um plano de movimento são estabelecidas na análise da trama rochosa.
- Analítico: ensaios laboratoriais teóricos de resistência de materiais, similares 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





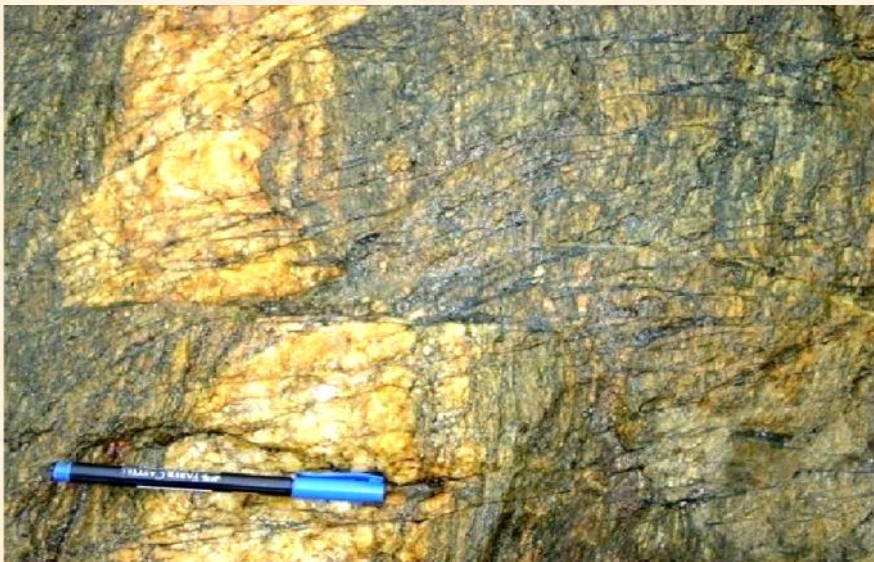
Evolução da  
deformação de acordo  
com:

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

(Hobbs, Means e  
Williams, 1976)

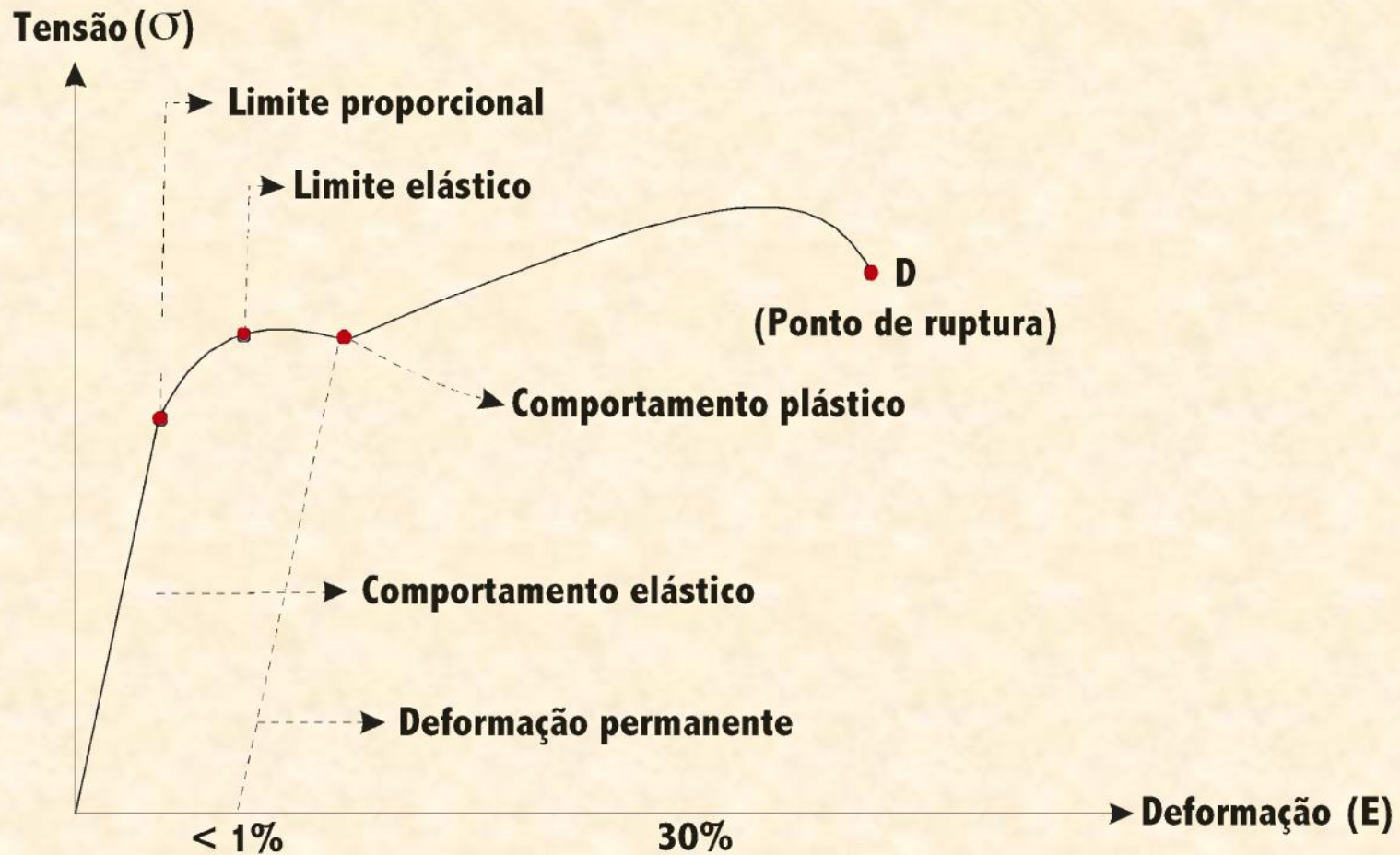
## Gráfico Tensão x Deformação

- 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.



Gnaise 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.

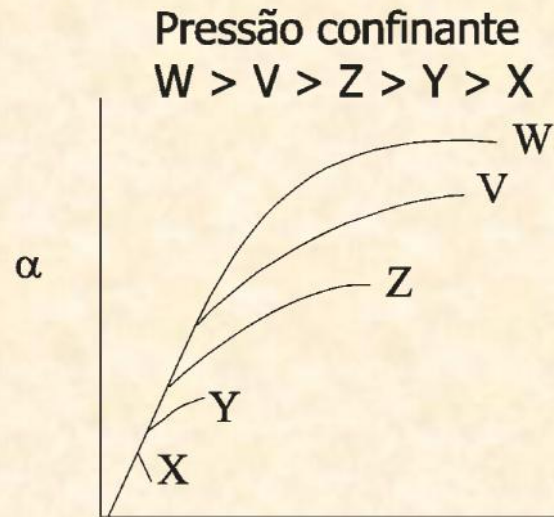
(b) Temperatura: facilita a deformação, tornando os materiais mais dúcteis, principalmente quando a pressão confinante e a temperatura somam seus efeitos.

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.

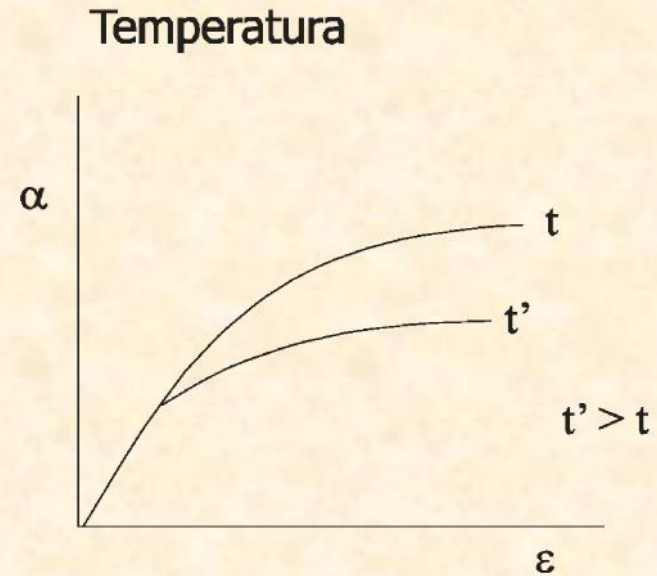
(c) Tempo de Aplicação do Esforço: se faz lentamente e com pausas - fenômeno comum na natureza – por meio de acréscimos infinitesimais.

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



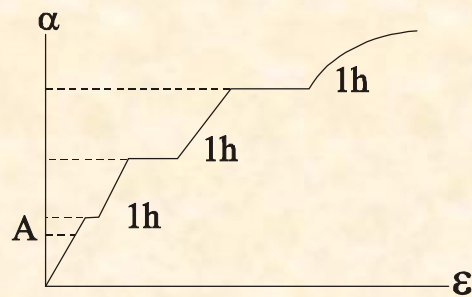


- a) Materiais frágeis tornam-se dúcteis;
- b) Aumenta o limite de elasticidade, limite de resistência máximo;
- c) Aumenta o ângulo de cisalhamentos com o eixo do corpo de prova.

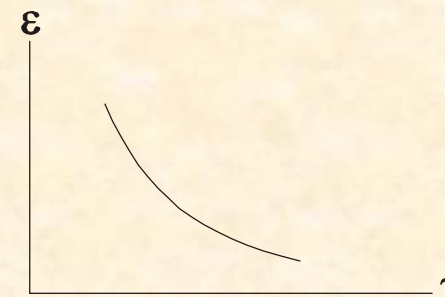


- a) Facilita a deformação;
- b) Diminui o limite de resistência, o esforço máximo e o limite de elasticidade.

**Tempo de aplicação do esforço**

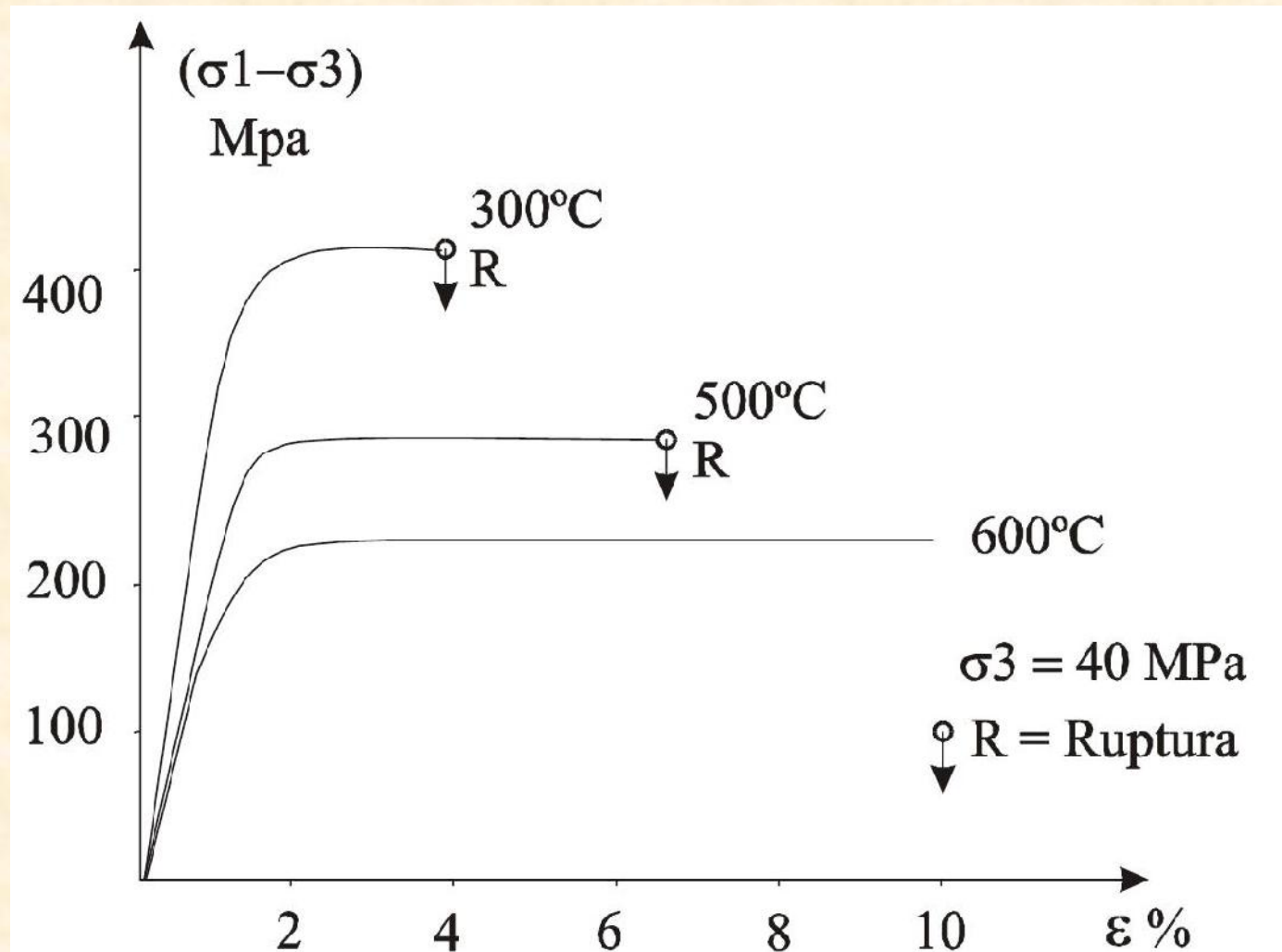


Aplicação do esforço com pausas de 1 hora

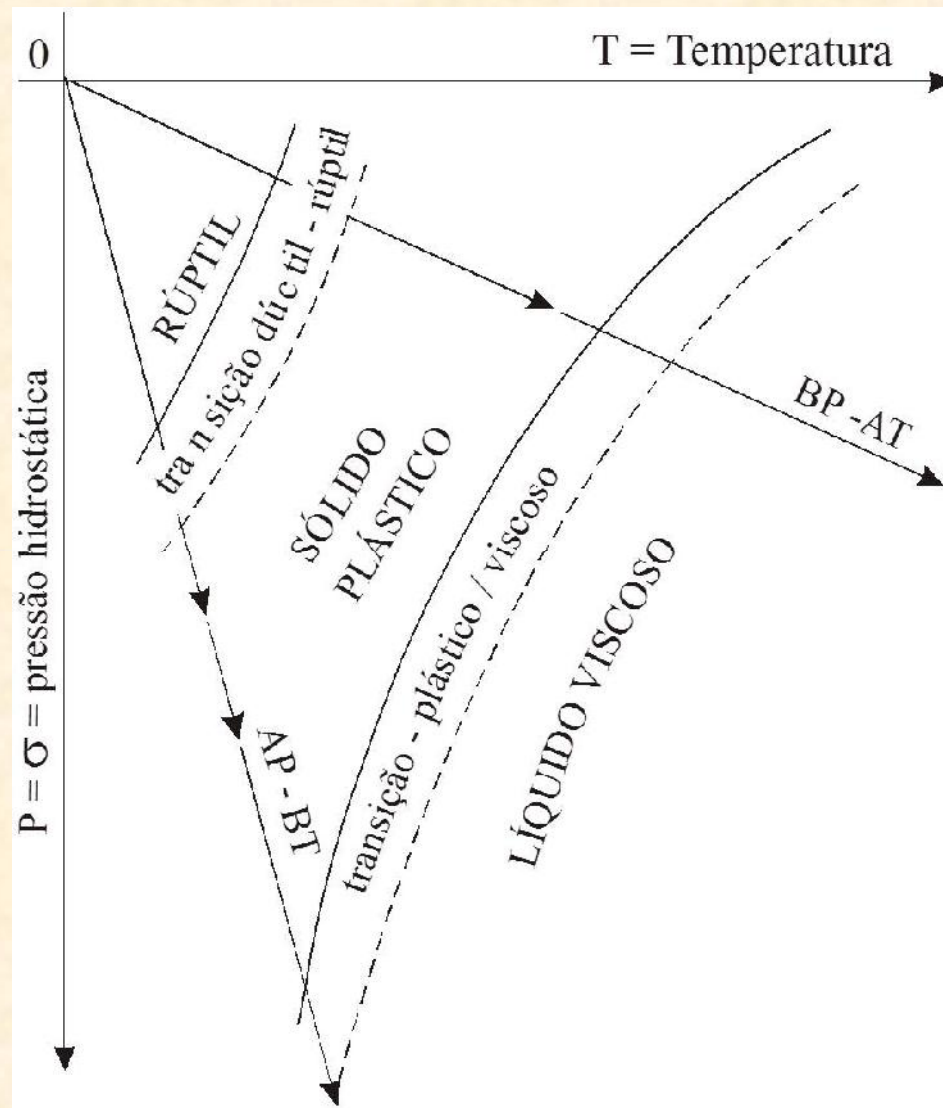


A deformação diminui exponencialmente com o tempo

## 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

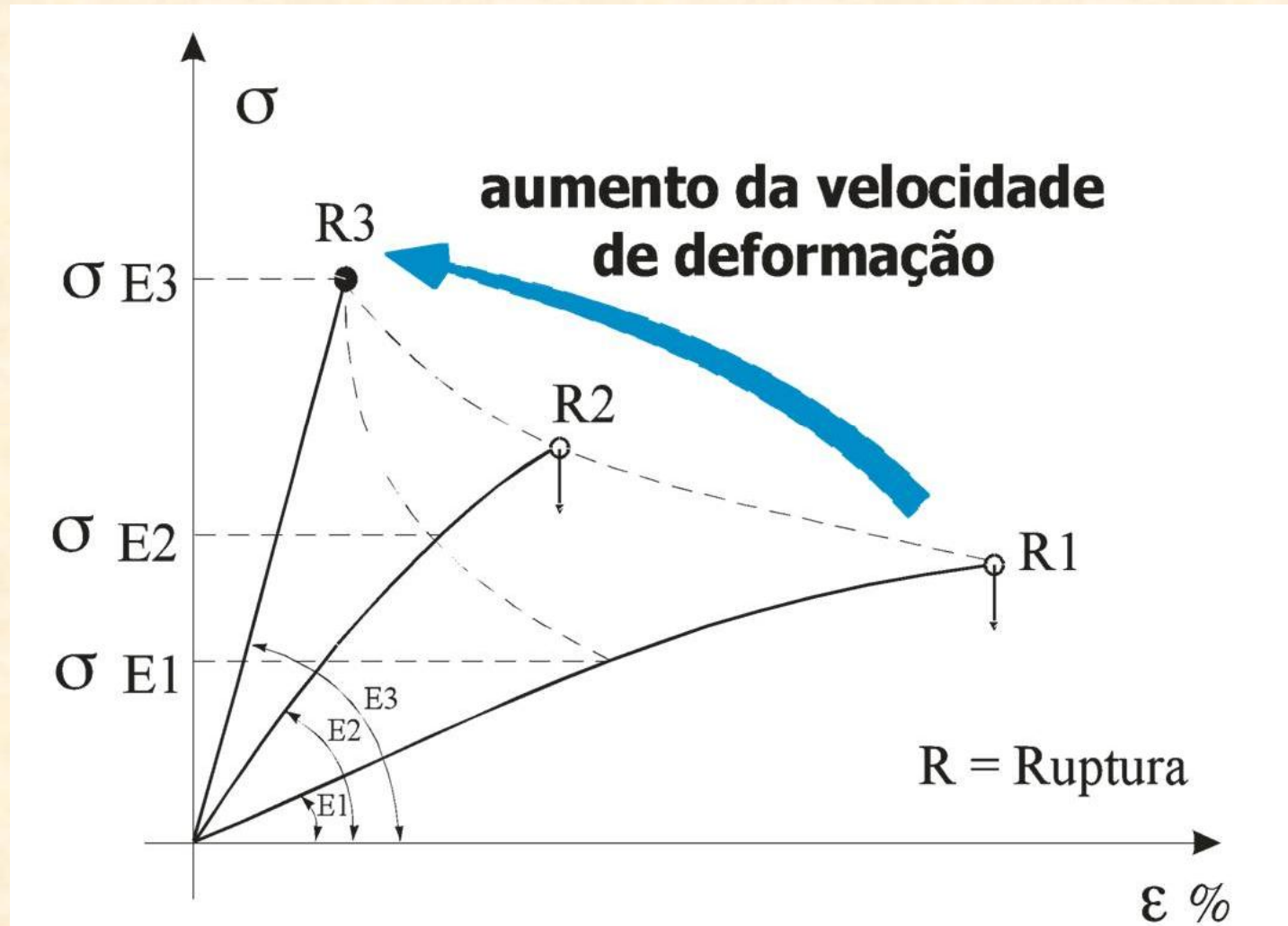
BP = baixa pressão

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

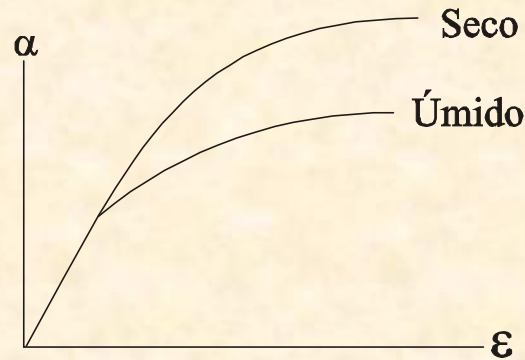
(d) Presença de Fluidos: o limite de plasticidade, o limite de resistência e o esforço máximo, diminuem com a presença das soluções (uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções).

(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.

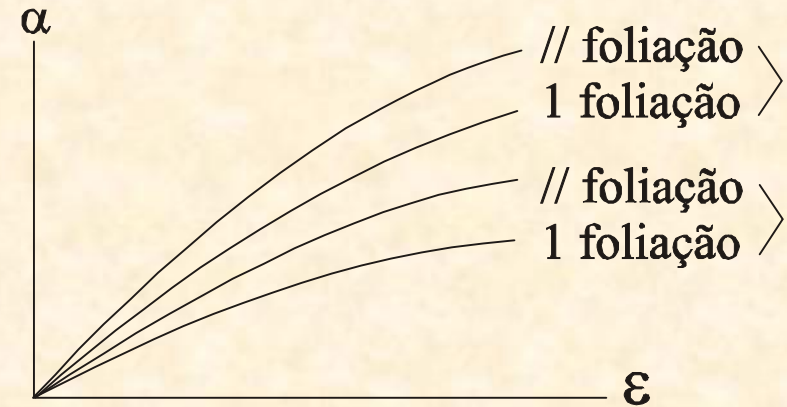
Willis (1932) introduziu o conceito de competência: rochas incompetentes são aquelas que se deformam sem se romperem e transmitem os esforços por distâncias maiores em função da ductibilidade; rochas competentes são relacionadas à deformação rúptil e fraturam com mais facilidade. Neste caso os esforços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

### Influência da presença de líquidos

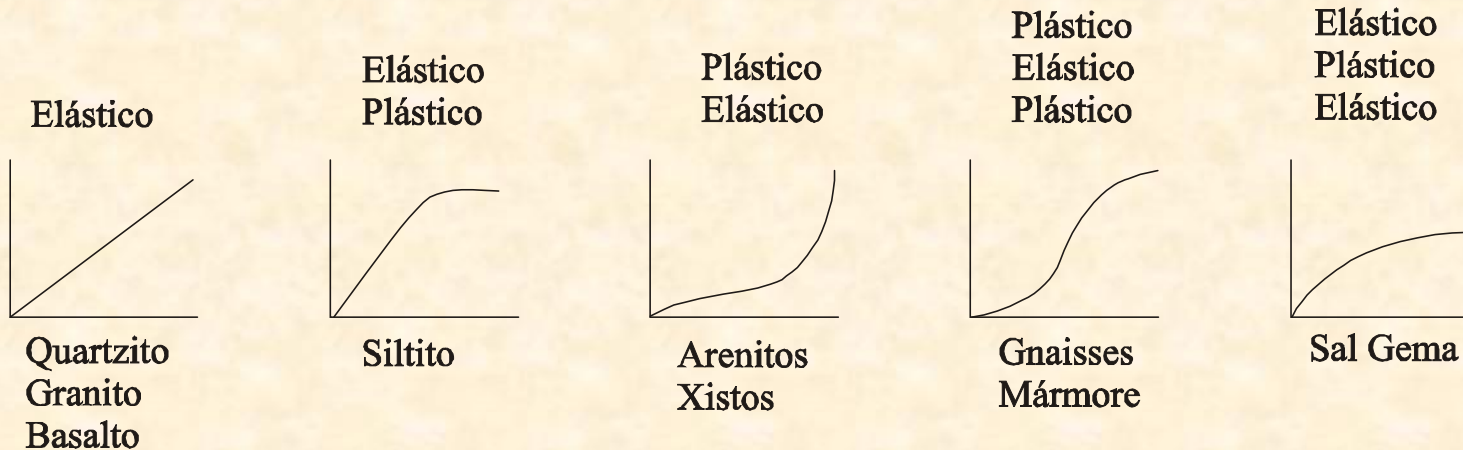


- a) Diminui o limite de resistência, de elasticidade e o esforço máximo;
- b) Uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções;
- c) Diferentes soluções produzem efeitos diferentes.

### 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 ( $\tau$ ), 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 ( $\tau_n$  normal e  $\tau_s$  cisalhante) são marcadas em um plano como pontos simples, sendo  $\tau_n$  medido no eixo horizontal e  $\tau_s$  na vertical.

Valores de  $\tau_n$  e  $\tau_s$

$$F = \tau \cdot A$$

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

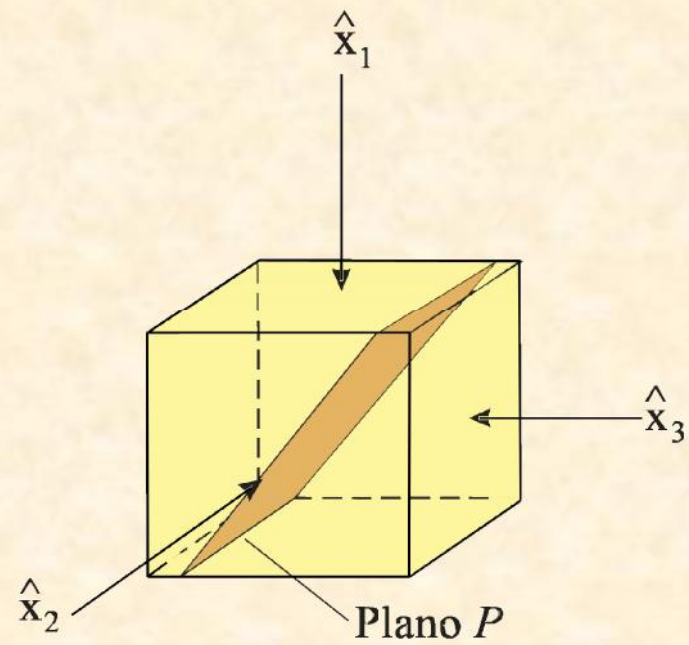
$$\tau_s = 1/2 (\tau_1 - \tau_3) \cdot \sin 2\theta$$

F = Força máxima aplicada pela pressão

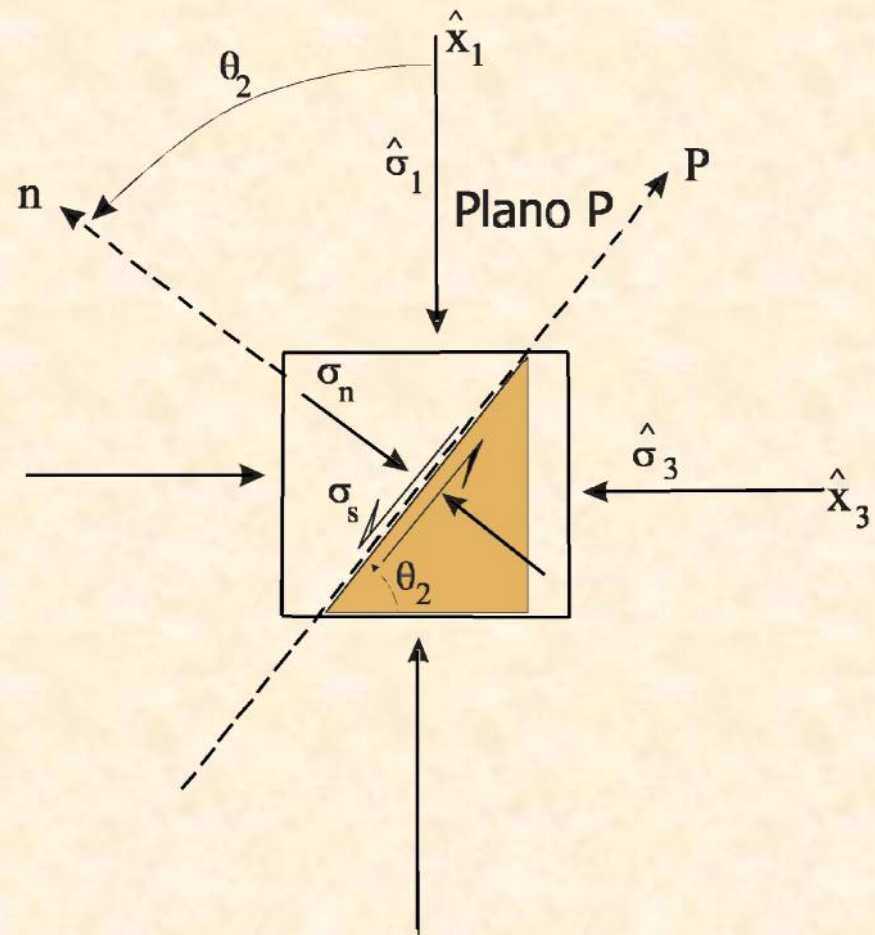
A = Área do plano arbitrado para o estudo

$\theta$  = Ângulo entre o plano arbitrado em relação á direção de Fz

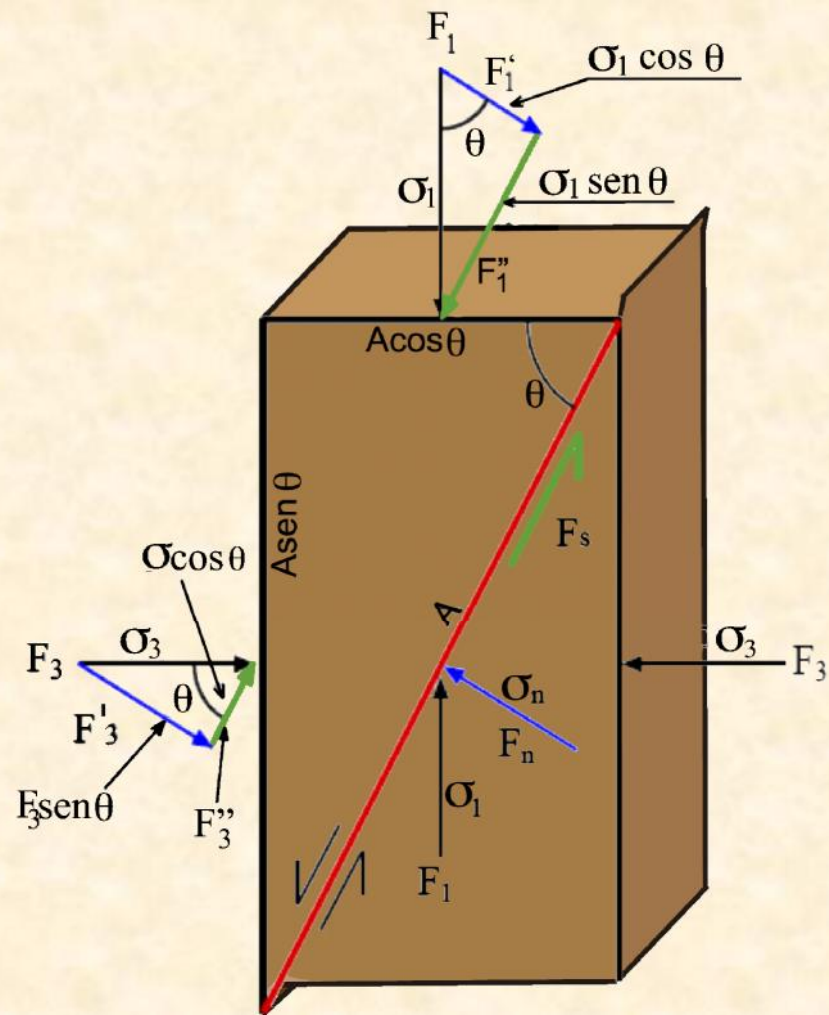
$\sigma$  = Tensão total



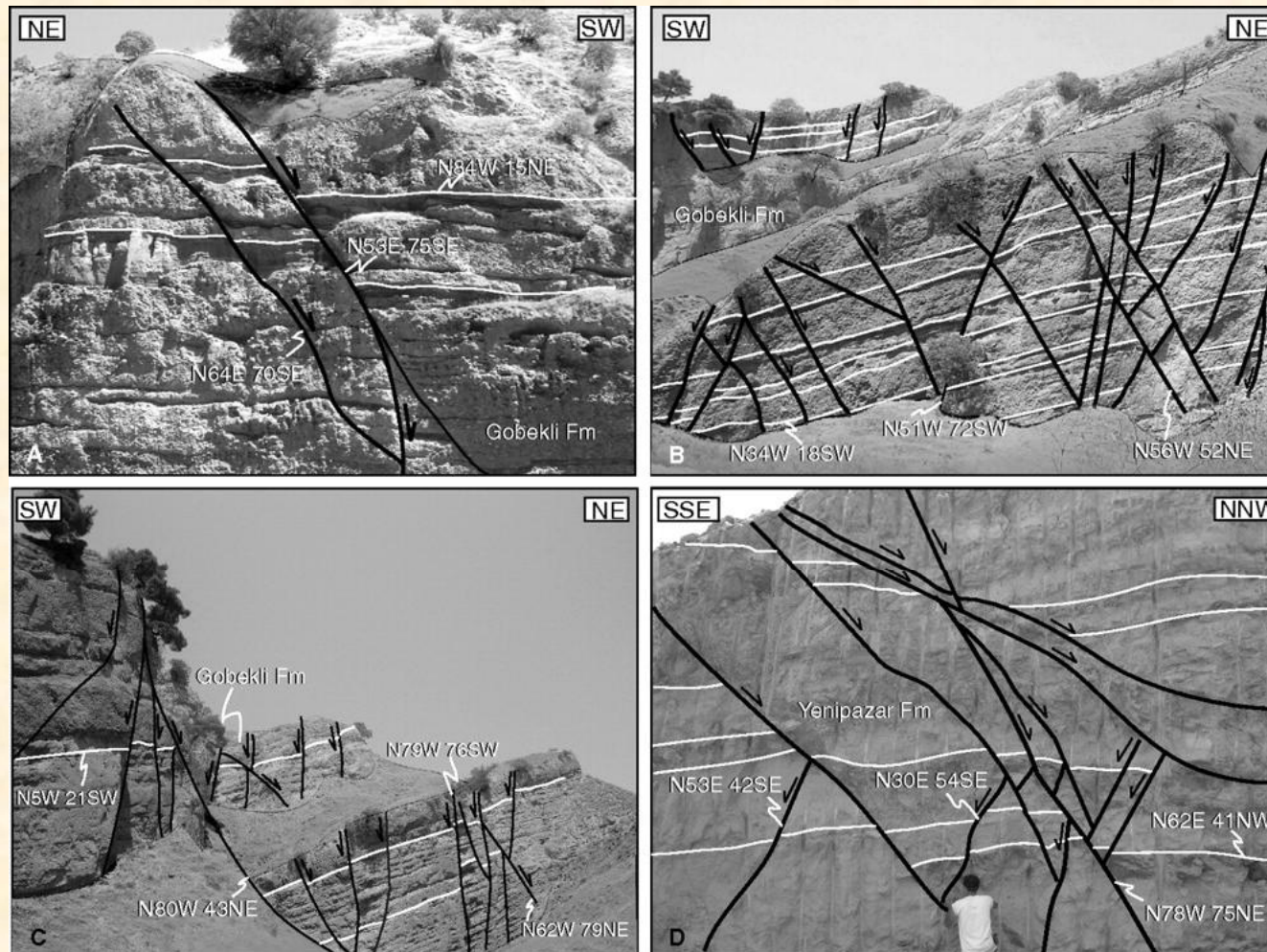
## Componentes do STRESS







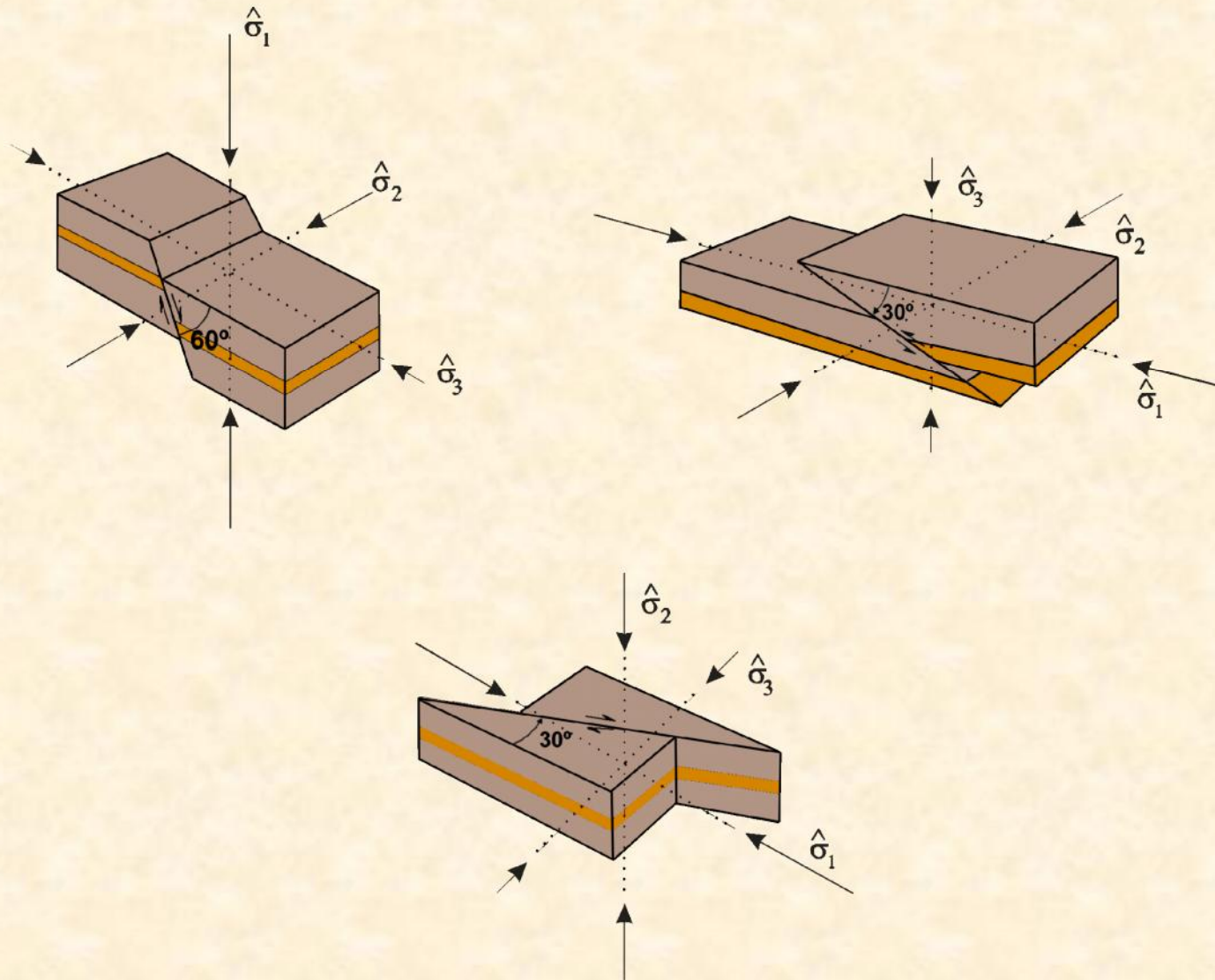
Fonte: [www.geosurvey.state.co.org](http://www.geosurvey.state.co.org)



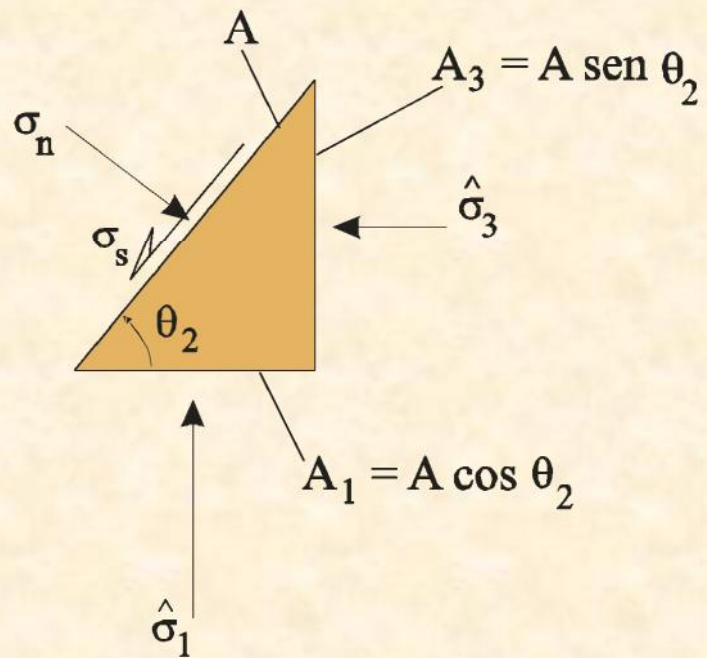
Exemplos de falhas normais que podem ser estudadas à luz do Círculo de Mohr. Fonte: [www.gsabulletin.gsapubs.org](http://www.gsabulletin.gsapubs.org)

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

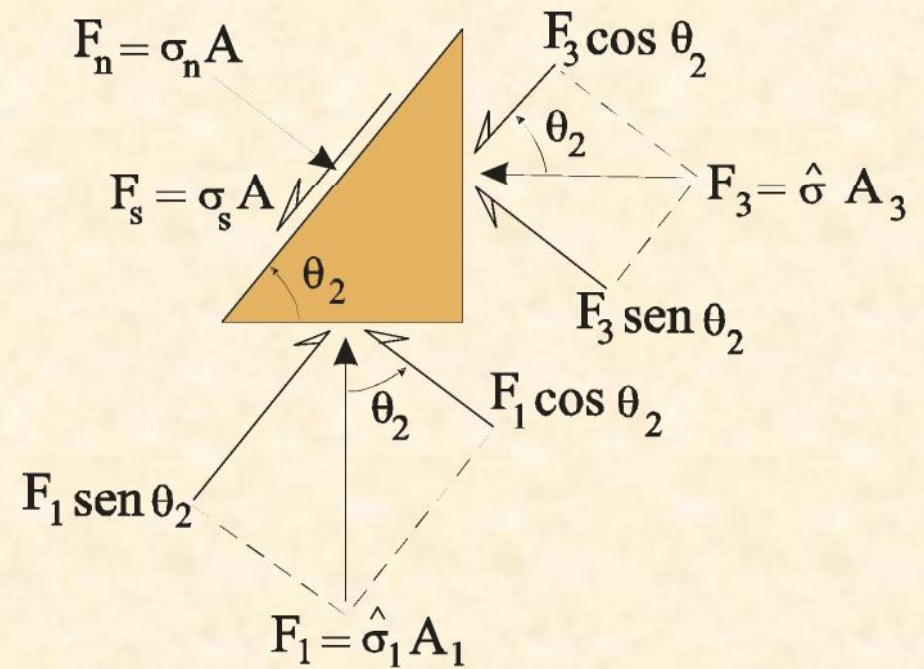
---



## 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.

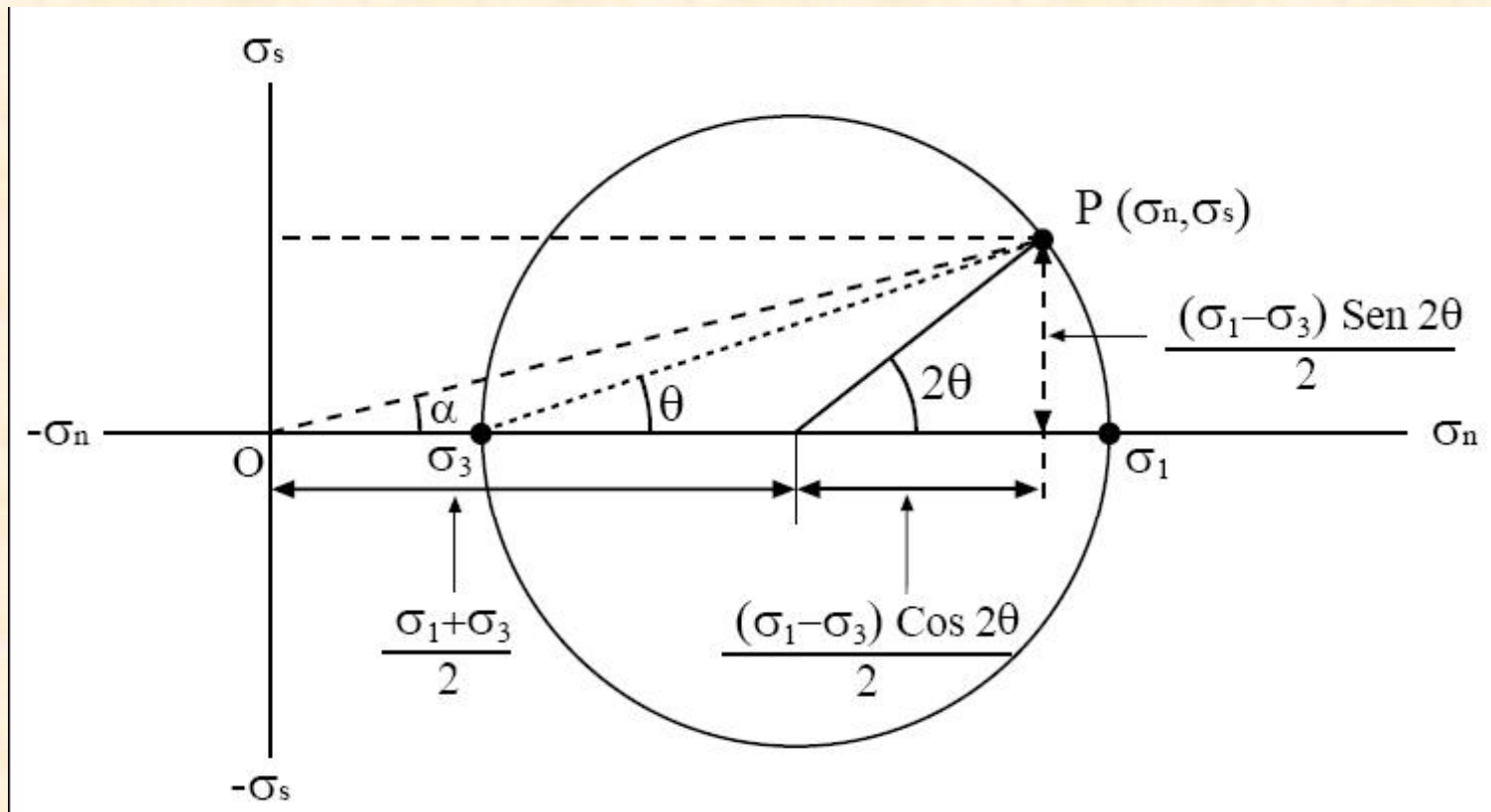
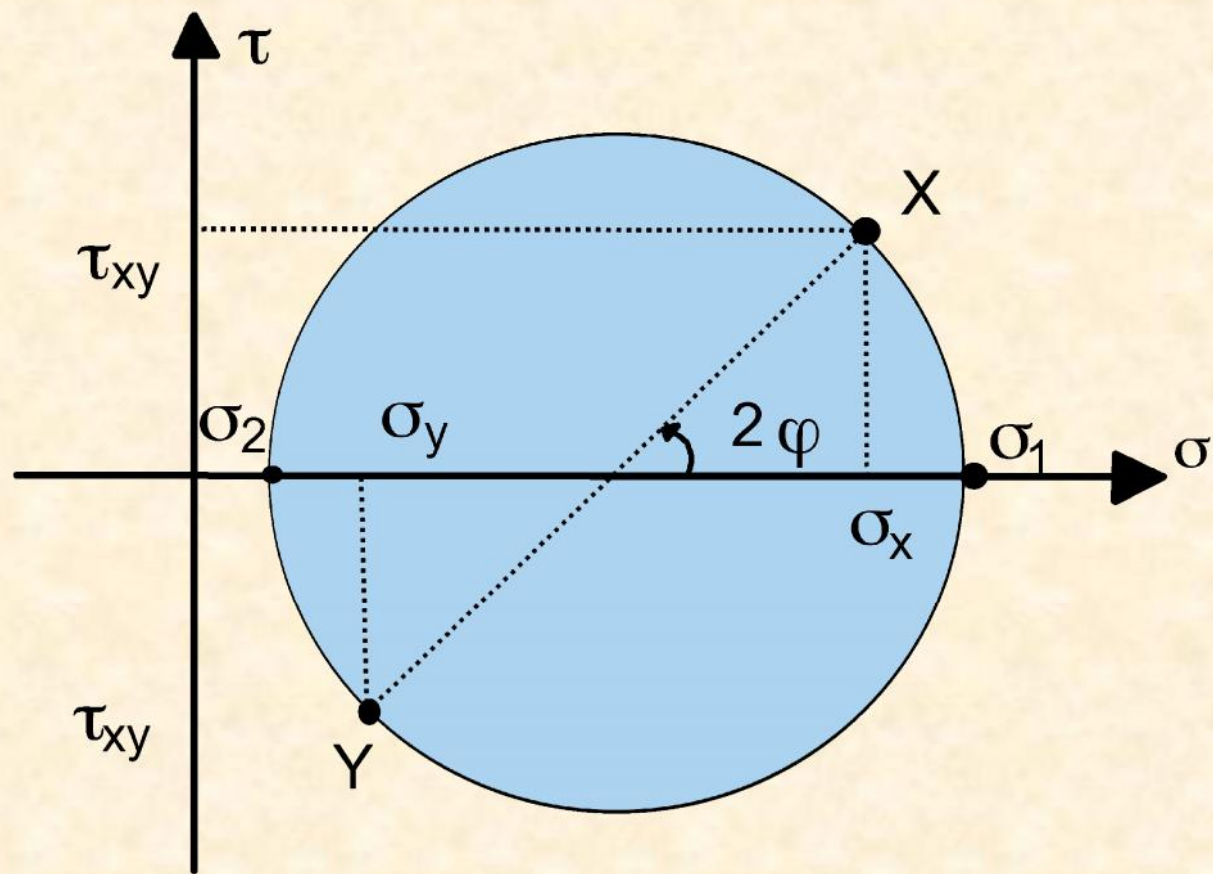
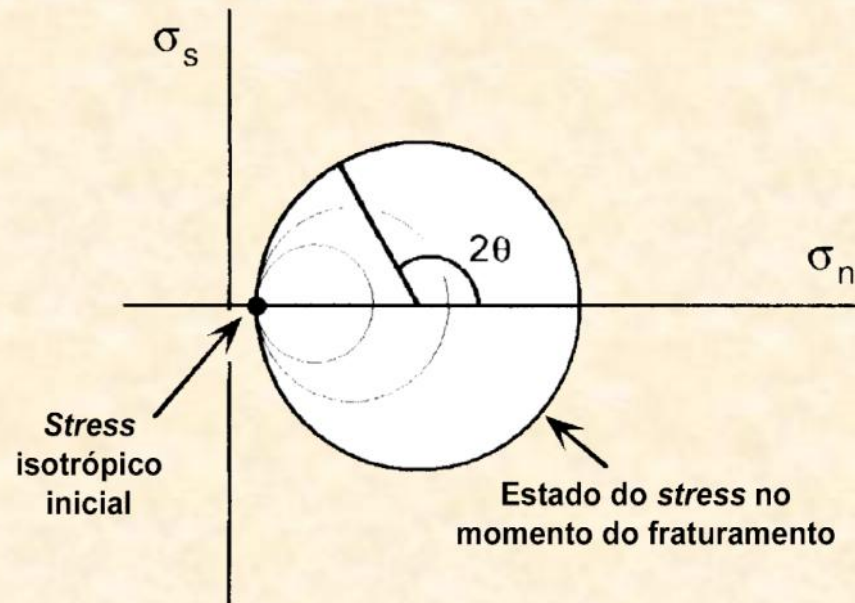
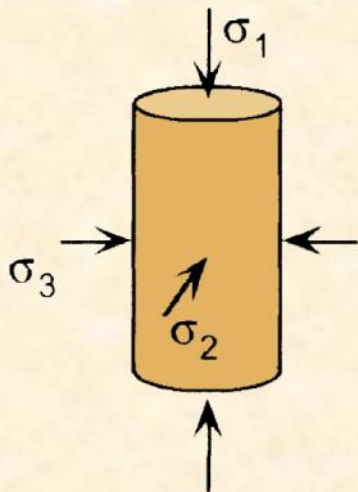
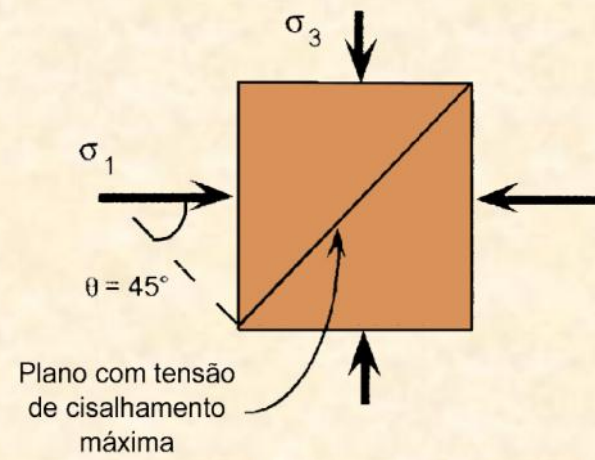
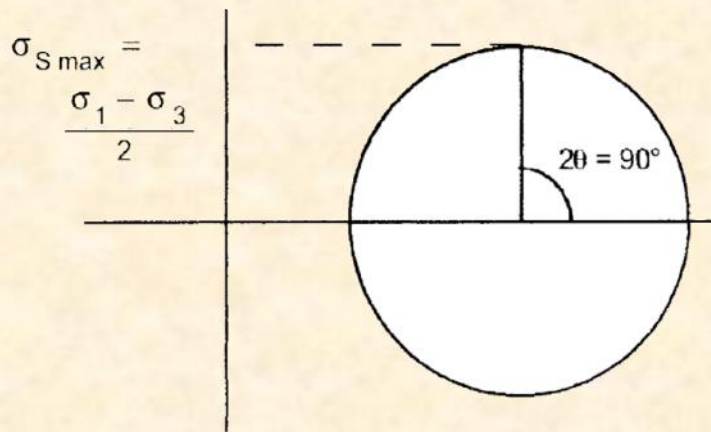


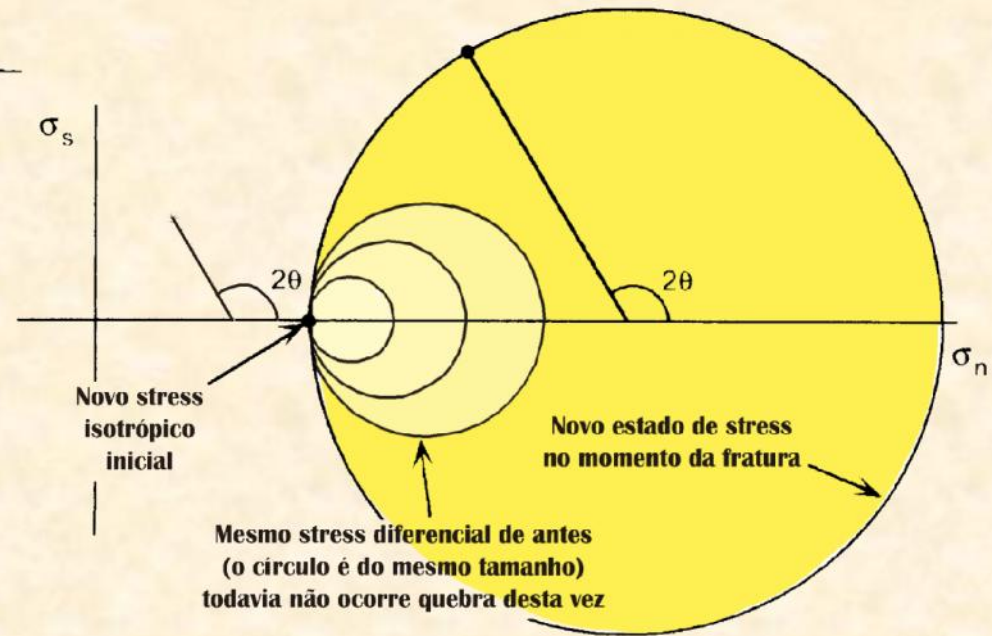
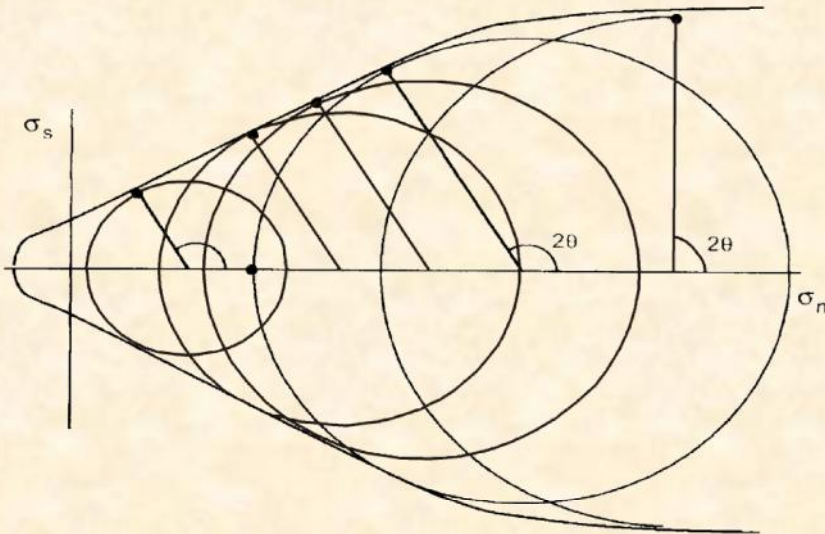
Diagrama ou círculo de Mohr. O ponto (P) representa um plano qualquer, orientado a um ângulo ( $\theta$ ) em relação a ( $\sigma_3$ )







# Envelope ou Envoltória de Mohr



# Exemplo de aplicação

