



TÓPICOS DE GEOMECÂNICA EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

- Curso de Modelagem Hidrogeoquímica
- Área de Petróleo

Aula 1

- Introdução
- Conceitos básicos
Tensão / Deformação



- Ministrado em paralelo com a disciplina de Modelagem Hidrogeoquímica;
- **Público alvo:** Dirigido para um público com conhecimento básico/intermediário na área;
- **Objetivo:** Equalizar conhecimentos de geomecânica fazendo associação com os assuntos de hidrogeoquímica (CCS/CCUS);
- **Habilidades a serem desenvolvidas:** Ao final os alunos deverão estar familiarizados com os tópicos do conteúdo do curso e deverão saber o que é necessário para elaborar um modelo numérico e quais informações podem ser obtidas da simulação fluxo-geomecânica;
- **Metodologia:** Aulas expositivas remotas e presenciais (on-line nas quartas-feiras de 14:00 às 16:00h);
- **Avaliação:** Participação nas aulas e apresentação de exercícios de fixação/trabalhos;
- **Conteúdo programático:** A seguir;
- **Referências/Bibliografia:** A seguir.



Conteúdo Programático

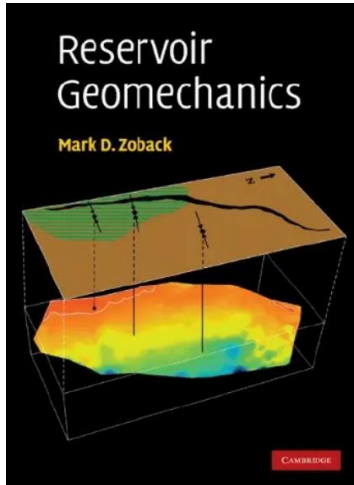
TÓPICOS DE GEOMECÂNICA

- Introdução
- Conceitos básicos
 - Tensão / Deformação
 - Transformações
 - Invariantes
 - Tensões Principais
- Teoria da Elasticidade
 - Lei de Hooke
 - Módulos de elasticidade
 - Termoelasticidade / Poroelasticidade
 - Tensão efetiva
- Fratura da rocha
 - Critérios de ruptura
 - Ruptura por tração / cisalhamento / compactação
 - Efeitos dos fluidos na ruptura
- Tensões *in-situ* / principais
 - Falha e o estado de tensões
 - Estimativa da pressão de poros
- Tensões em torno do poço *
- Rochas e ondas *
- Perfilagem de poços
- Geomecânica de reservatórios
 - Compactação
 - Driver de compactação
 - Efeitos na porosidade / permeabilidade
 - Subsidência
 - Trajetória de tensões
 - Fraturamento hidráulico
 - Geomecânica na simulação numérica de reservatórios
 - Estratégias de perfuração e produção
- Modelo geomecânico: 1D e 3D

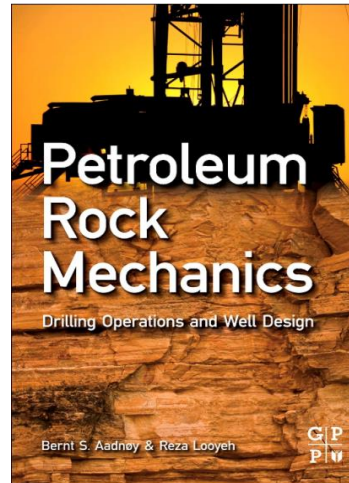


Bibliografia

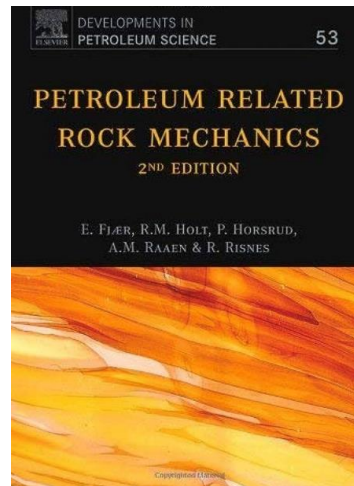
TÓPICOS DE GEOMECAÂNICA



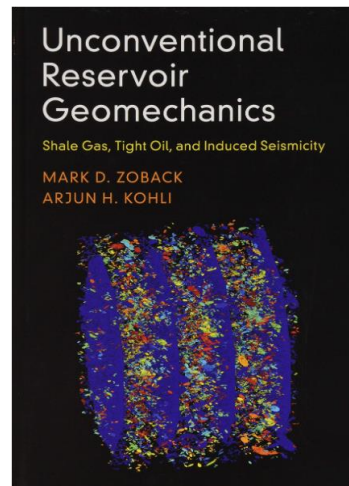
M. D. Zoback



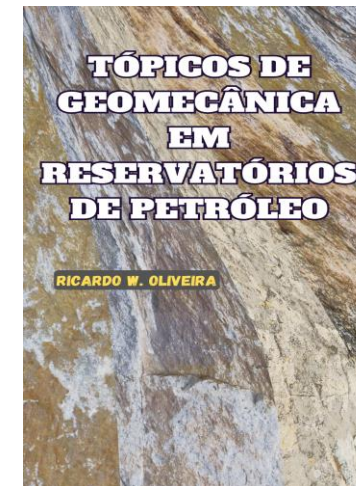
B. Aadnøy



Erling Fjær



M. D. Zoback



R. Wanderley



Definição de Geomecânica

- Geomecânica estuda o comportamento mecânico das rochas/solos em resposta às alterações de tensão, pressão, temperatura (e composição química).

Geomecânica vs Geotecnia

“A definição de geomecânica é confusa. Existe diferença entre geotecnologia, engenharia geotécnica e geomecânica? Além disso, há diferença entre geologia de engenharia e engenharia geológica, áreas também intimamente relacionadas à geotecnologia, engenharia geotécnica e geomecânica?”

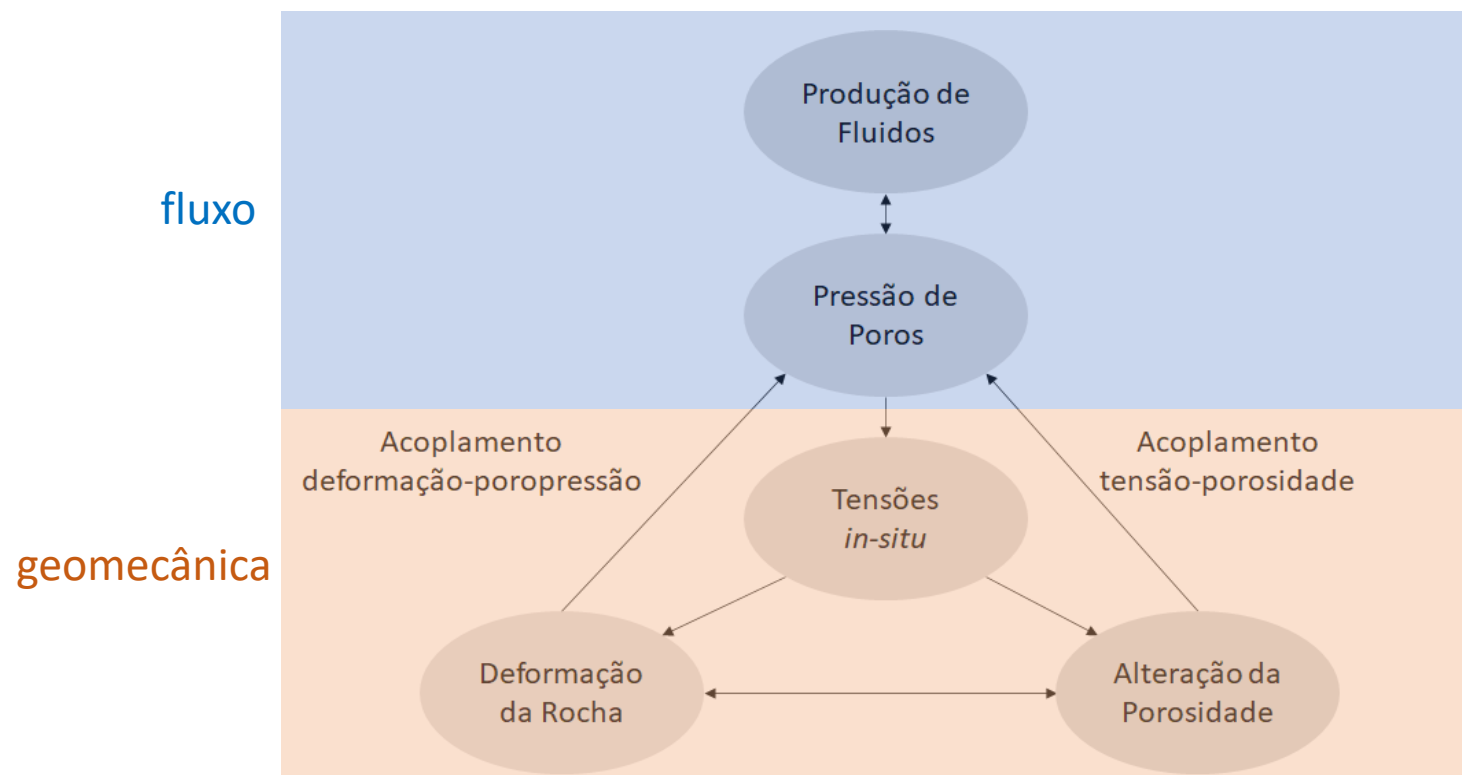
"Enquanto a geotecnologia e a engenharia geotécnica se concentram nos solos, a geomecânica combina geologia, mecânica dos solos e mecânica das rochas." "Geomechanics Challenges and its Future Direction – Food for Thought”, Ghana Mining Journal, pp. 14 - 20

"O projeto de engenharia geotécnica é baseado em modelos matemáticos, constitutivos e numéricos implementados em códigos computacionais que são capazes de prever o comportamento de geoestruturas e fundações sob uma ampla variedade de condições de carregamento, às vezes exigentes ou extremas." <https://doi.org/10.1002/nme.3192>



Definição de Geomecânica

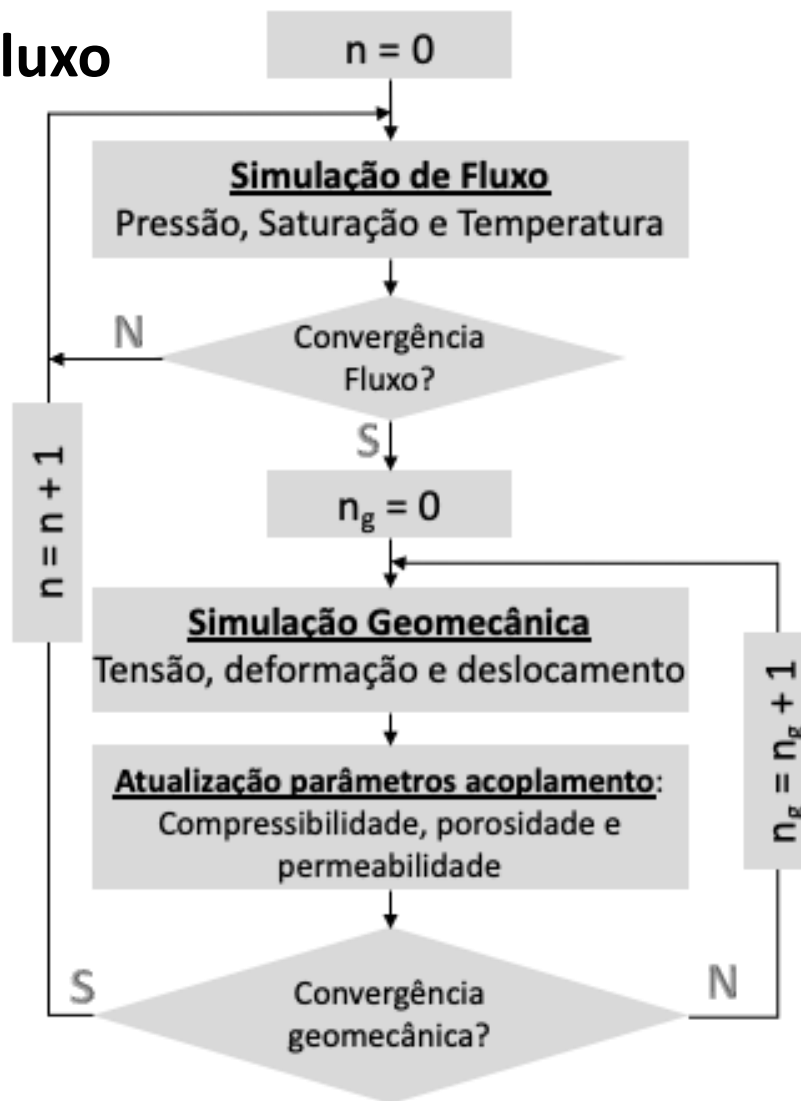
Na área de petróleo “Geomecânica” é o termo amplamente utilizado no estudo do comportamento mecânico das rochas em associação com a modelagem de fluxo.



Cadeia de efeitos fluxo-deformação - adaptado de Gutierrez, M. e Lewis, R. W. (1998).



Geomecânica na Simulação de Fluxo



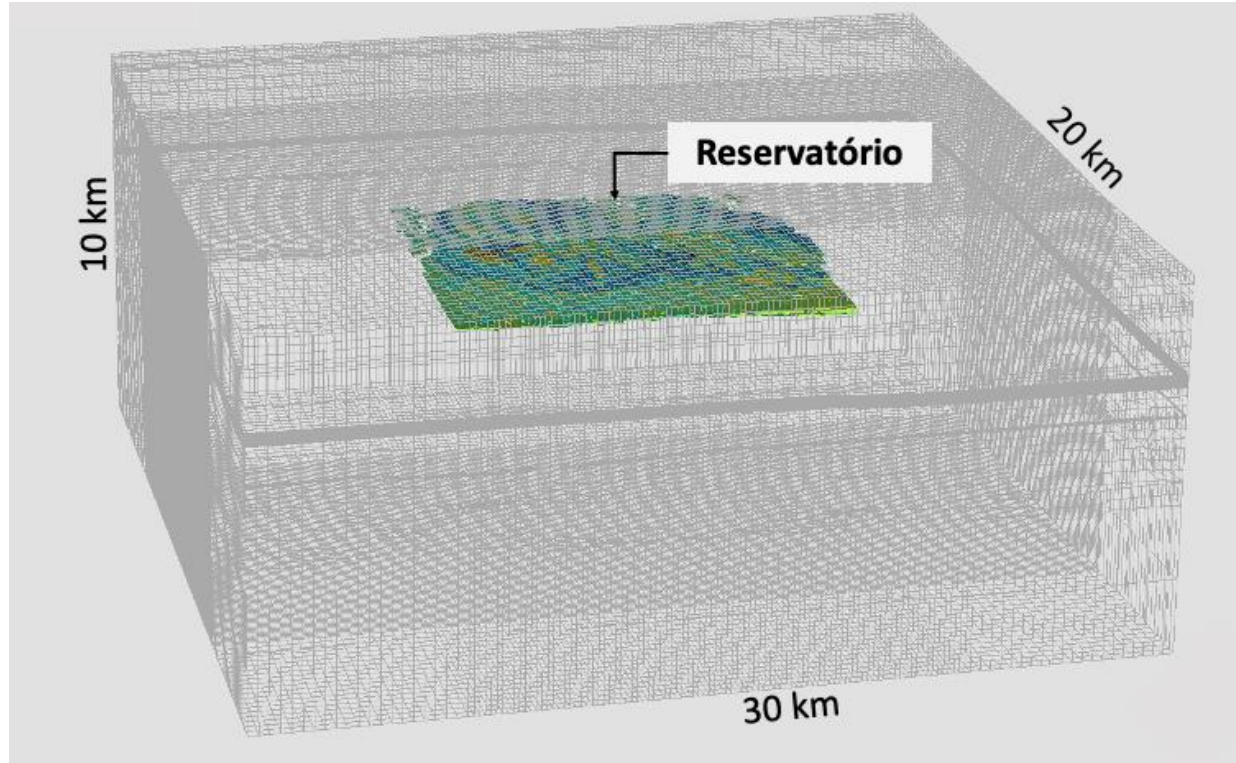
Acoplamento fluxo-geomecânico - adaptado de Fleming, P. D. (2004).



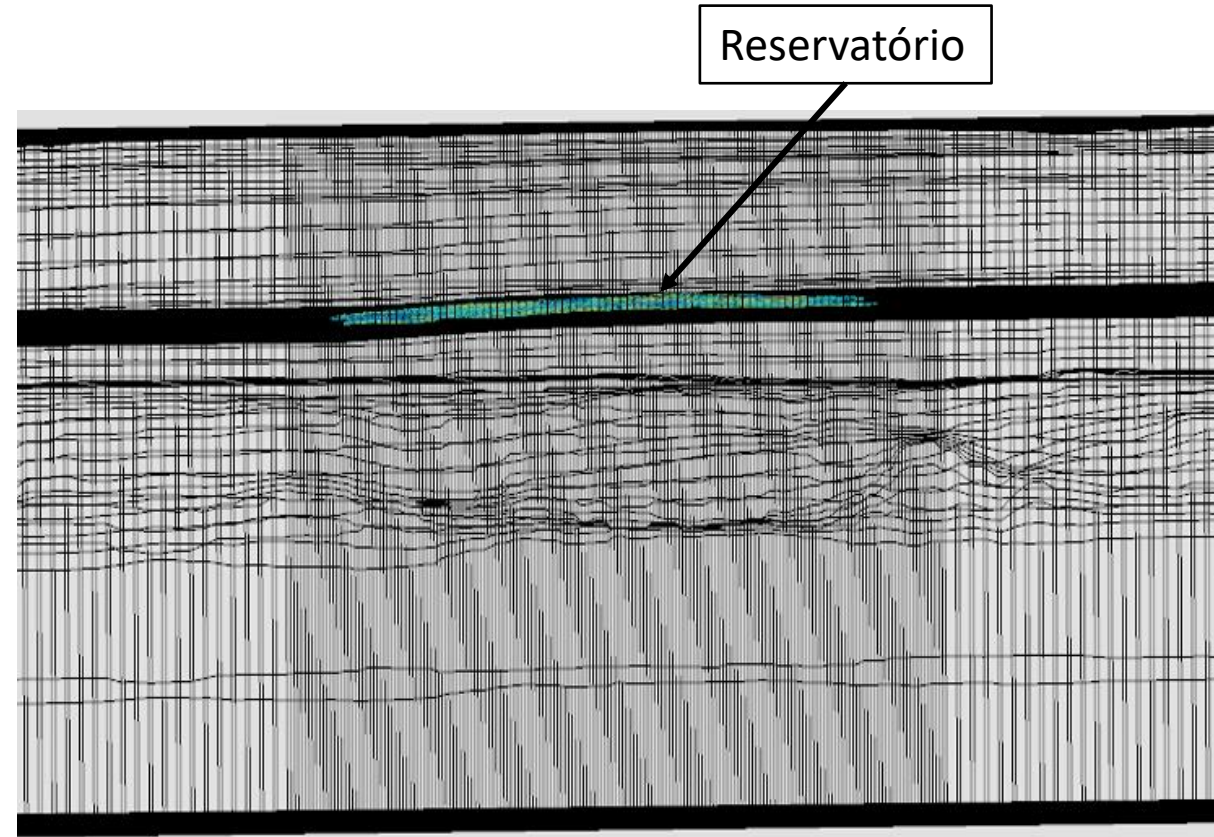
Introdução

TÓPICOS DE GEOMECÂNICA

Modelo Geomecânico 3D



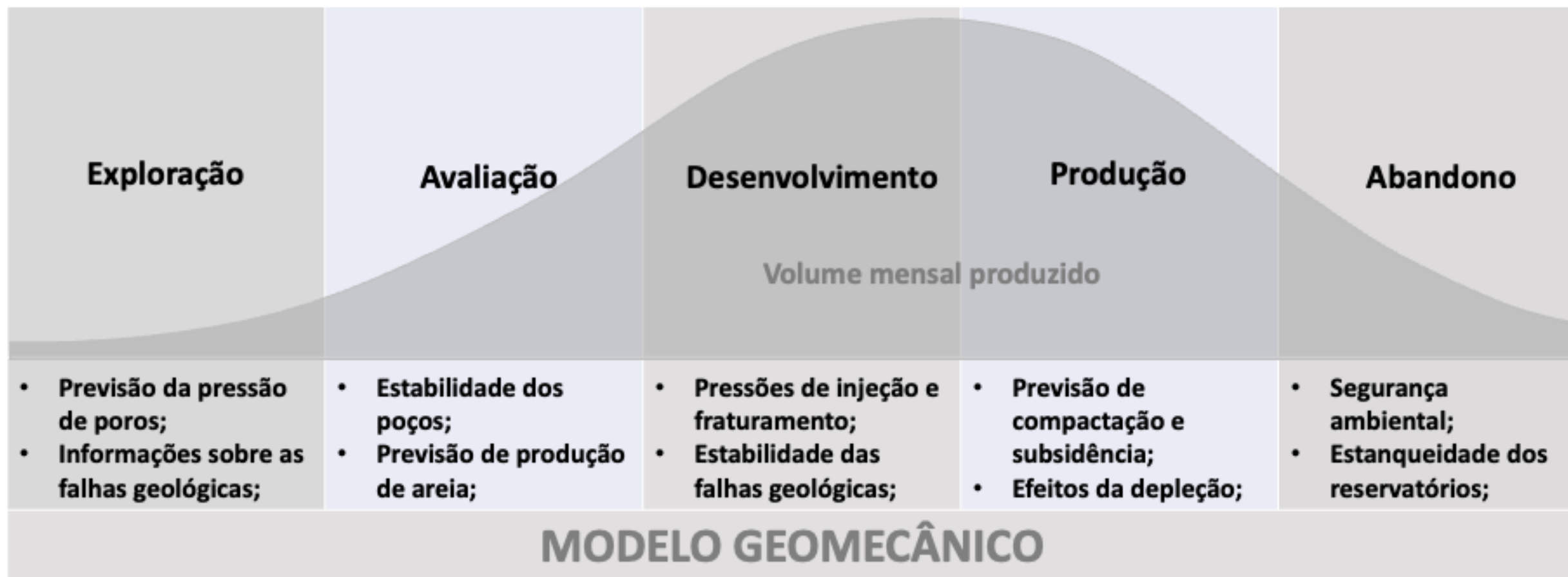
Perspectiva



Vista Lateral



Modelo Geomecânico / Fases do reservatório



Geomecânica nas fases da vida produtiva de um reservatório de petróleo.



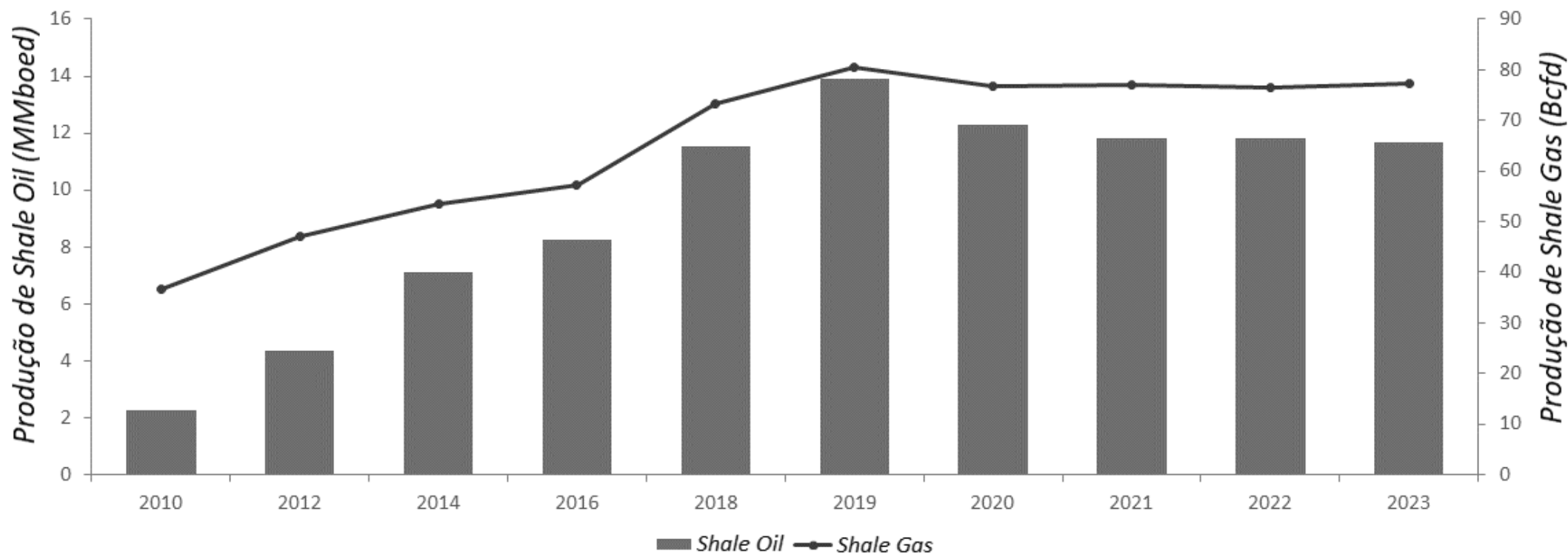
Principais elementos a serem considerados numa análise geomecânica:

- Avaliação das cargas e das condições em que as formações estão submetidas (tensão, pressão e temperatura);
- Entendimento do estado de tensões (magnitude, direção) e regime de falhas geológicas atualmente ativo;
- Modelos de fluxo, geológico e geofísico disponíveis;
- Perfis, ensaios em laboratório e correlações disponíveis;
- Dados disponíveis das propriedades mecânicas das rochas;
- Tipo de modelo geomecânico a ser adotado (analítico ou numérico);
- Pressões, temperatura e características dos fluidos a serem injetados;
- Critérios de projetos (poços, completação e equipamentos de superfície, ...);
- Conhecimento das restrições operacionais do campo.



Geomecânica em reservatórios não convencionais (shale):

A partir do início dos anos 2000, uma expressiva quantidade de óleo e gás passou a ser explotada de rochas com baixíssima permeabilidade (shale), que passaram a ser denominadas reservatórios não convencionais.

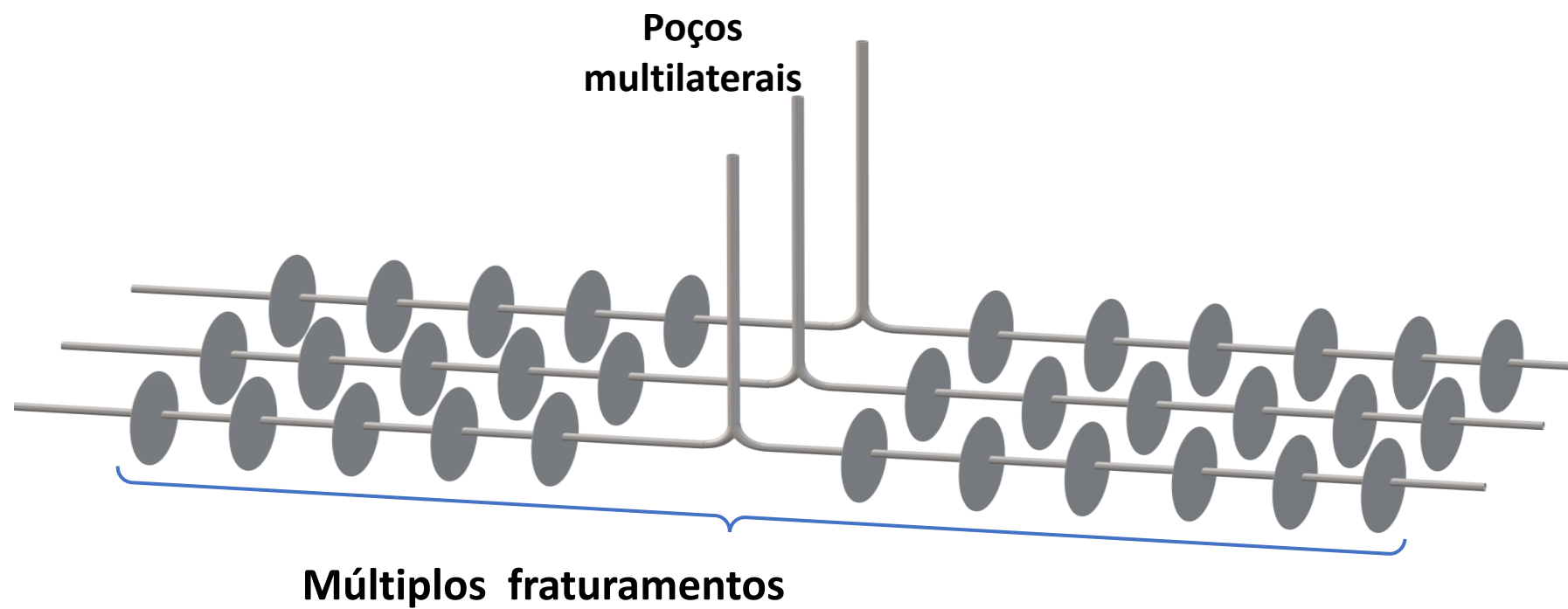


Histórico e previsão de produção de Shale-Oil e Shale-Gas - Fonte:(Global, Oil. Gas., 2020).



Geomecânica em reservatórios não convencionais (shale):

A produção econômica a partir desse tipo de rocha só foi possível através da perfuração de poços multilaterais submetidos a vários estágios de fraturamento hidráulico.



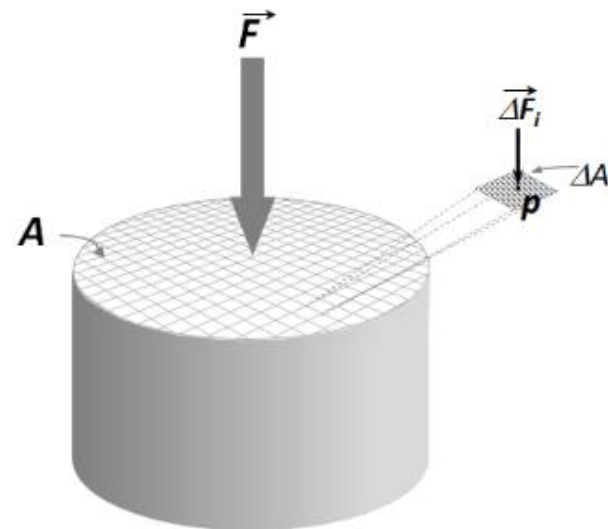
Tensão

Relação entre uma força (F) e a área (A) perpendicular à sua direção.

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

Tensão em um ponto é o valor limite da força por unidade de área quando a área tende a zero.

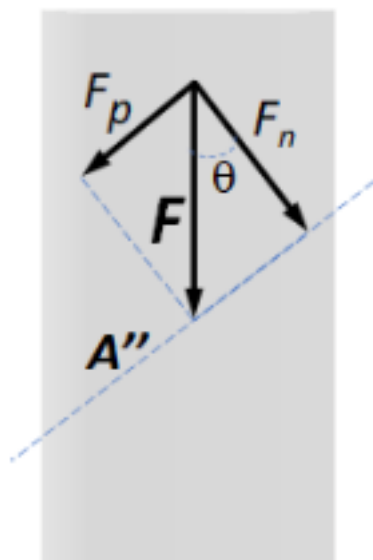
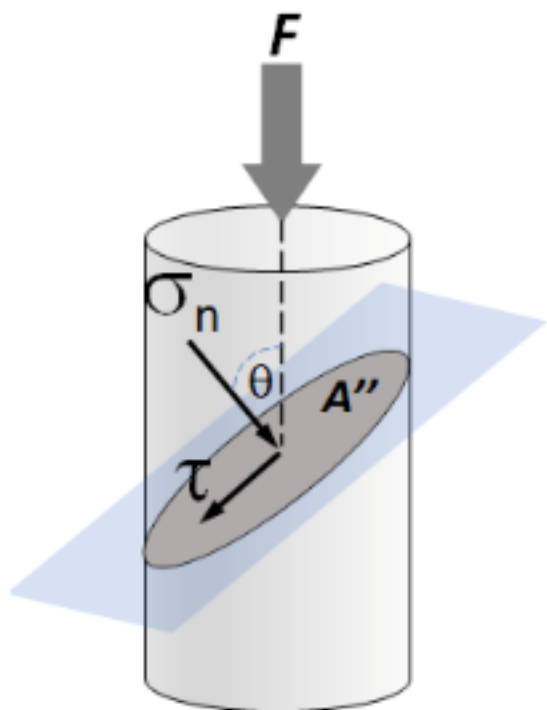
$$\sigma_p = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta A_i}$$



Tensão definida em um ponto.

Componentes da Tensão

Quando a força não é perpendicular a área, teremos:



$$\sigma_n = \frac{F_n}{A''}$$

Componente Normal

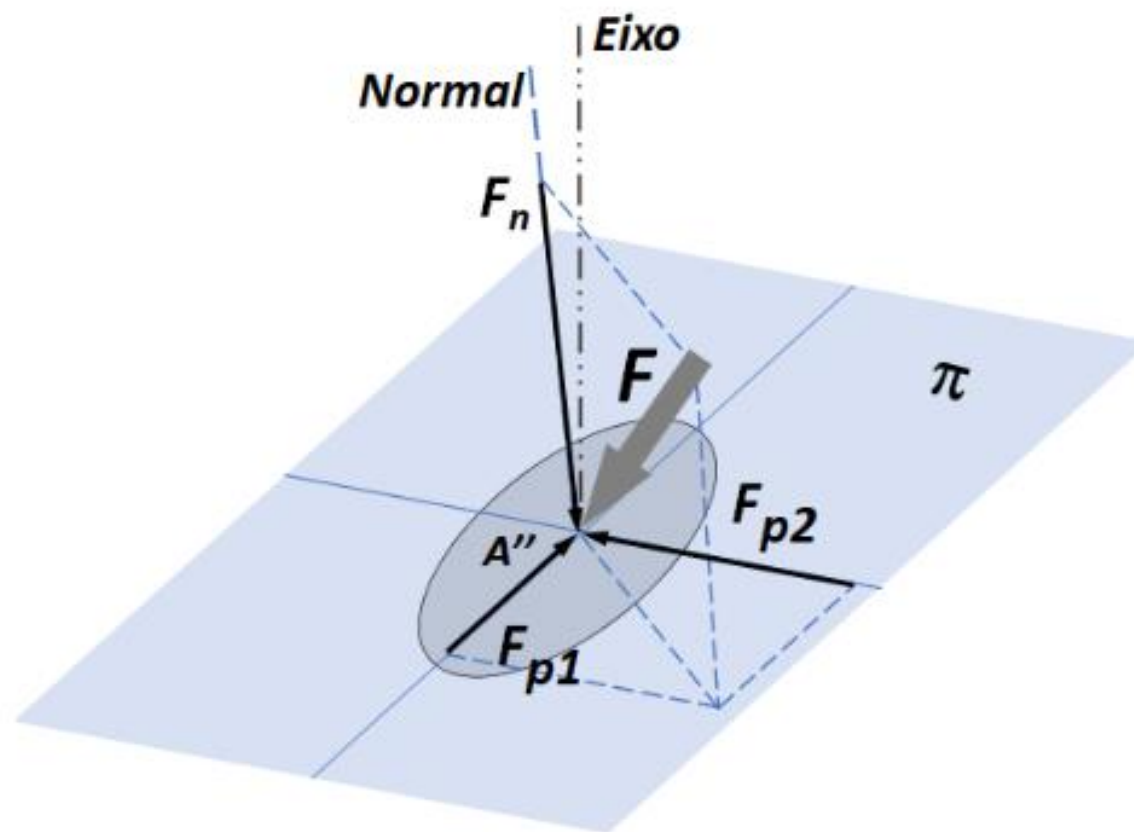
$$\tau = \frac{F_p}{A''}$$

Componente Cisalhante



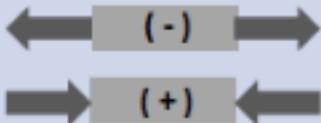

Componentes da Tensão

Decomposição em três dimensões:



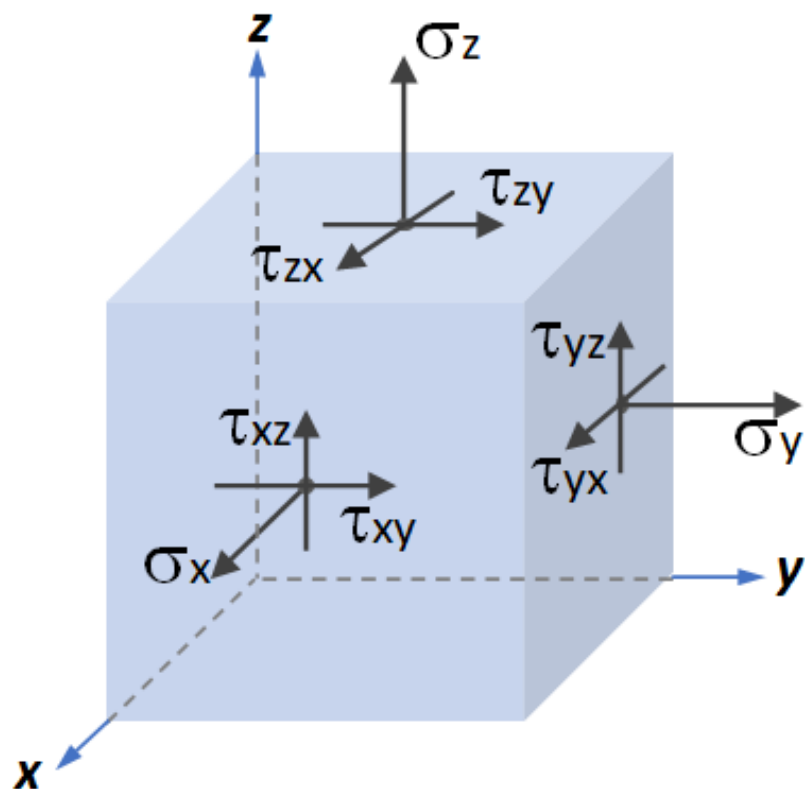


Tensão – Convenção de sinais (Mecânica das Rochas)

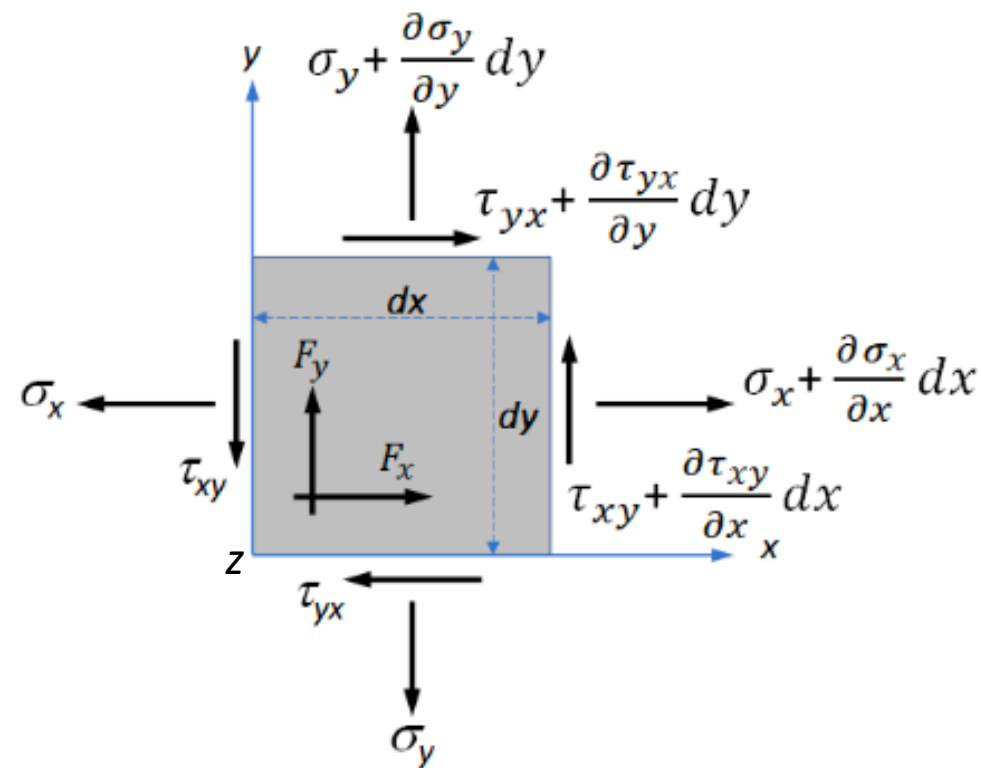
	Tensão	Símbolo
Normal		σ
Cisalhante		τ



Tensão – Equações diferenciais do equilíbrio



Tensões nas faces de um cubo.



Tensões em um corte perpendicular ao eixo **z**.



Tensão – Equações diferenciais do equilíbrio

Considerando as forças normais na direção do eixo **x**, temos:

$$-\sigma_x dy + \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dy$$

as forças cisalhantes, também na direção **x**, são:

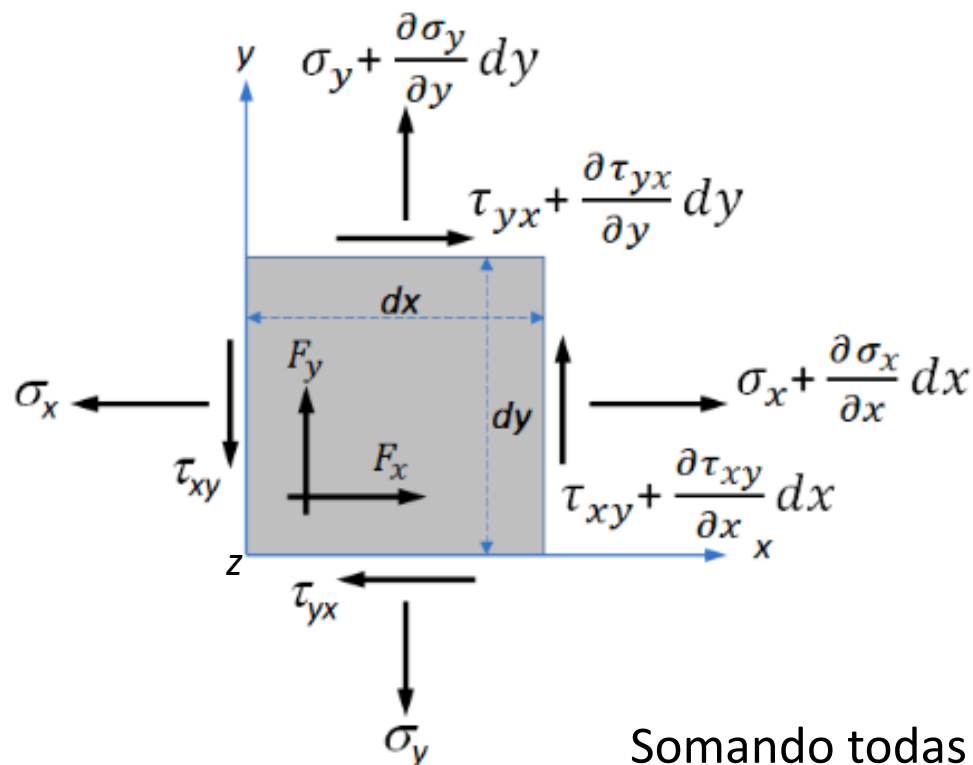
$$-\tau_{yx} dx + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx$$

a força de corpo que atua na direção **x**, é dada por:

$$F_x dx dy$$

Somando todas as forças atuantes na direção do eixo **x** e dividindo por **dx dy**, teremos:

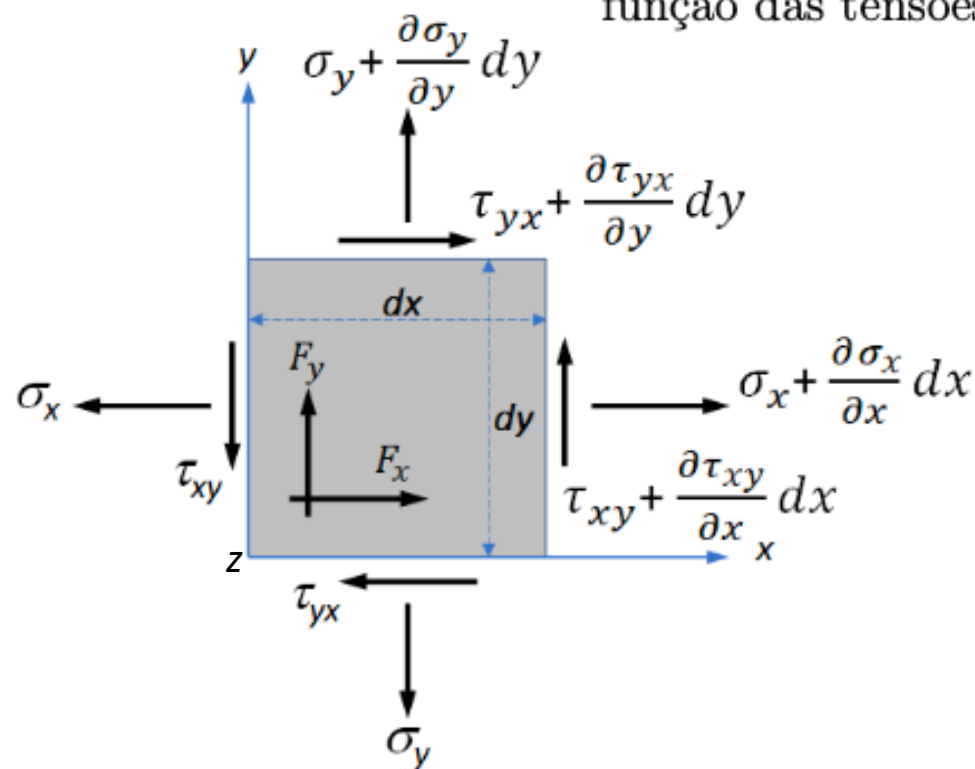
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + F_x = 0$$





Tensão – Equações diferenciais do equilíbrio

Procedendo de maneira similar para os eixos y e z, teremos um sistema de equações em função das tensões, que descreve como essas variam de um ponto a outro no sólido.

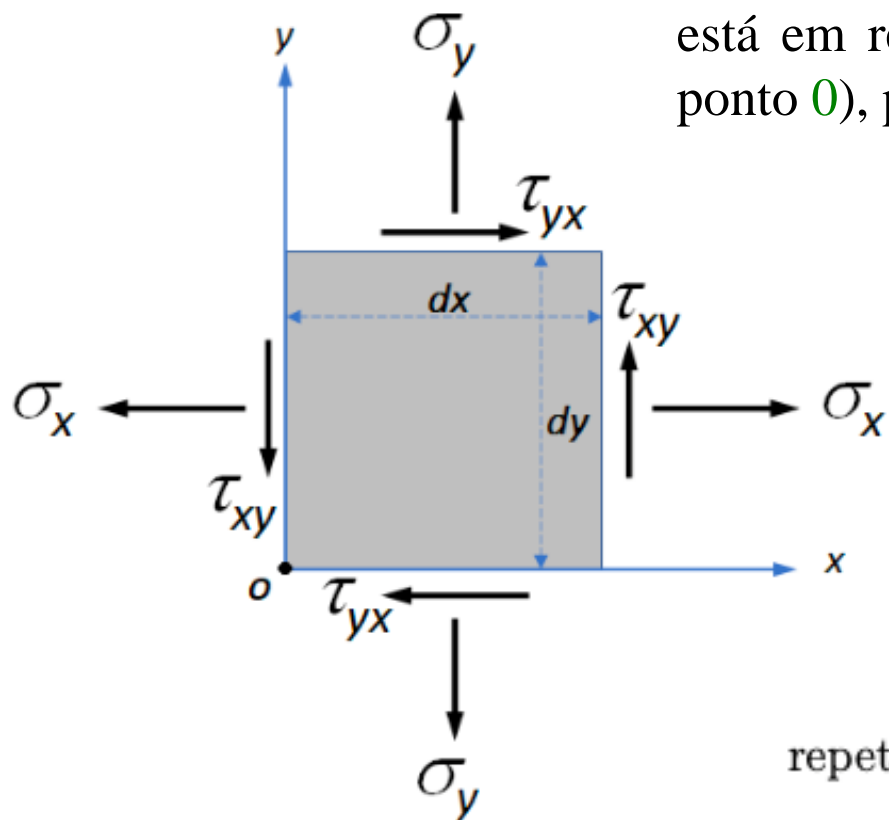


$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}$$



Tensão – Equações de momento

Considerando, novamente, a seção do sólido no plano $x - y$, sabendo que o mesmo está em repouso e utilizando a equação de equilíbrio de momento (em relação ao ponto O), podemos demonstrar que as tensões cisalhantes se cancelam:



Simplificando,

e finalmente,

$$\begin{aligned} \sum M_o = & -(\sigma_x dy) \frac{dy}{2} + (\tau_{xy} dy) dx - (\tau_{yx} dx) dy + (\sigma_y dx) \frac{dx}{2} + \\ & + (\sigma_x dy) \frac{dy}{2} - (\sigma_y dx) \frac{dx}{2} = 0 \end{aligned}$$

$$\sum M_o = (\tau_{xy} dy) dx - (\tau_{yx} dx) dy = 0$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

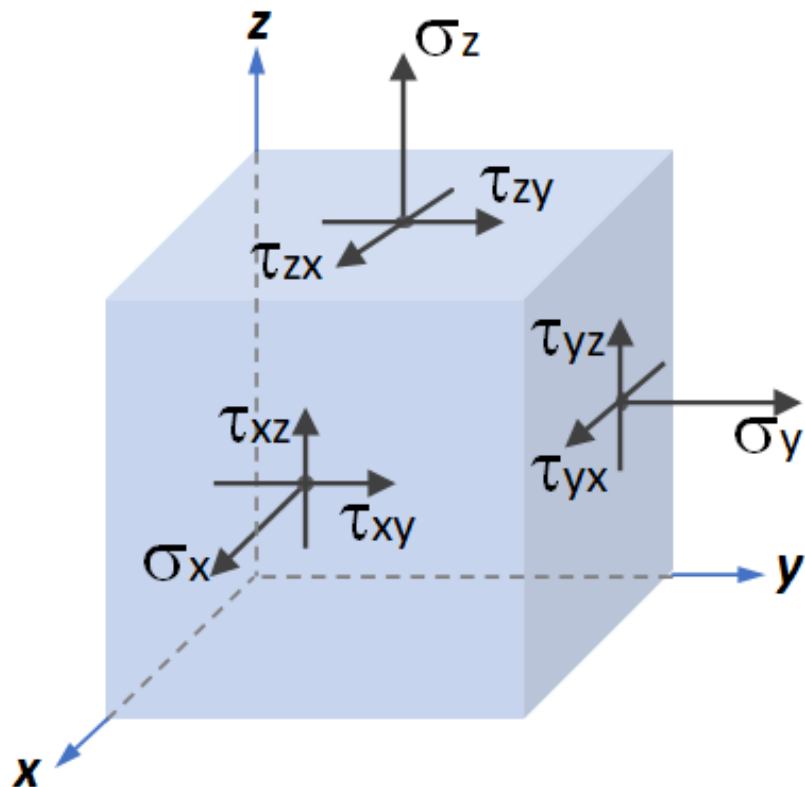
repetindo esse procedimento para os planos $x - z$ e $y - z$, teremos ainda:

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad e \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$



Tensão – Estado de Tensões

O Estado de tensões no cubo pode ser definido, então, por três tensões normais (σ_x , σ_y e σ_z) e três tensões cisalhantes ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ e $\tau_{yz} = \tau_{zy}$).



$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Tensor



Deformação - Considerações

Se as posições relativas das partículas de um corpo forem alteradas, dizemos que ele sofreu uma deformação. Quando um corpo está sob a ação de um carregamento ele poderá se deslocar, rotacionar e/ou se deformar. Ocorrendo isso, algumas (ou todas) partículas do corpo ocuparão outra posição no espaço após a ação dos esforços.

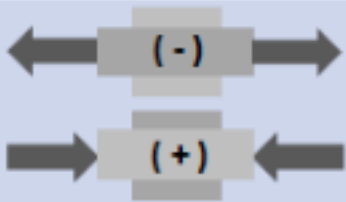

A deformação na engenharia é medida em relação as dimensões iniciais do corpo, o que, de fato, é uma considerável simplificação, uma vez que essas dimensões variam continuamente com a aplicação dos esforços. Por isso, para que essa suposição possa ser válida, se pressupõe que as deformações serão pequenas (infinitesimais) quando comparadas às dimensões do corpo, e que os deslocamentos e seu gradiente também sejam infinitesimais.

Essa abordagem é denominada de Teoria das Pequenas Deformações ou dos pequenos deslocamentos e se torna adequada para a análise de materiais elásticos relativamente rígidos.

Aqui usaremos esse tipo de simplificação.

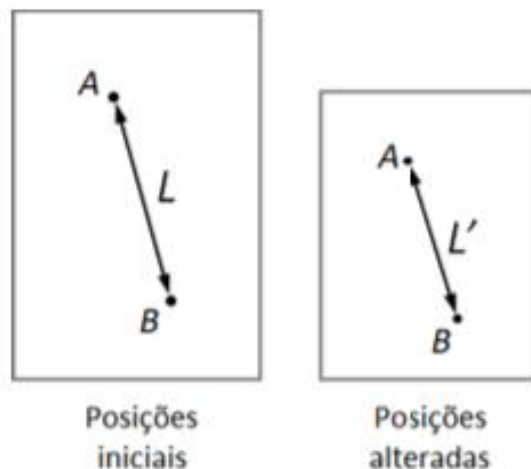


Deformação - Convenção de sinais (Mecânica das Rochas)

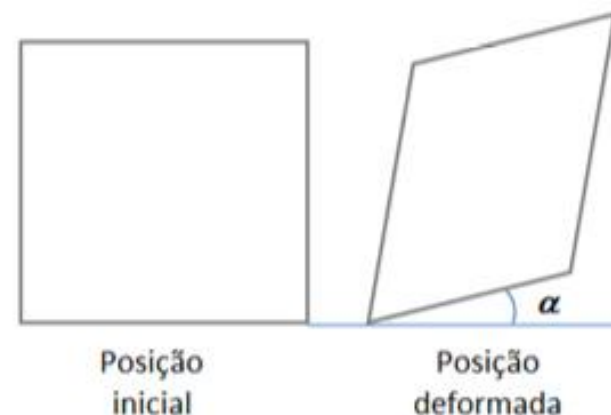
	Deformação	Símbolo
Normal		ϵ_x
Cisalhante		$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy}$

Deformação

Contração



Cisalhamento



A deformação, então, é calculada através da relação entre a variação do comprimento de um elemento e o seu valor inicial, no caso das deformações normais teremos:

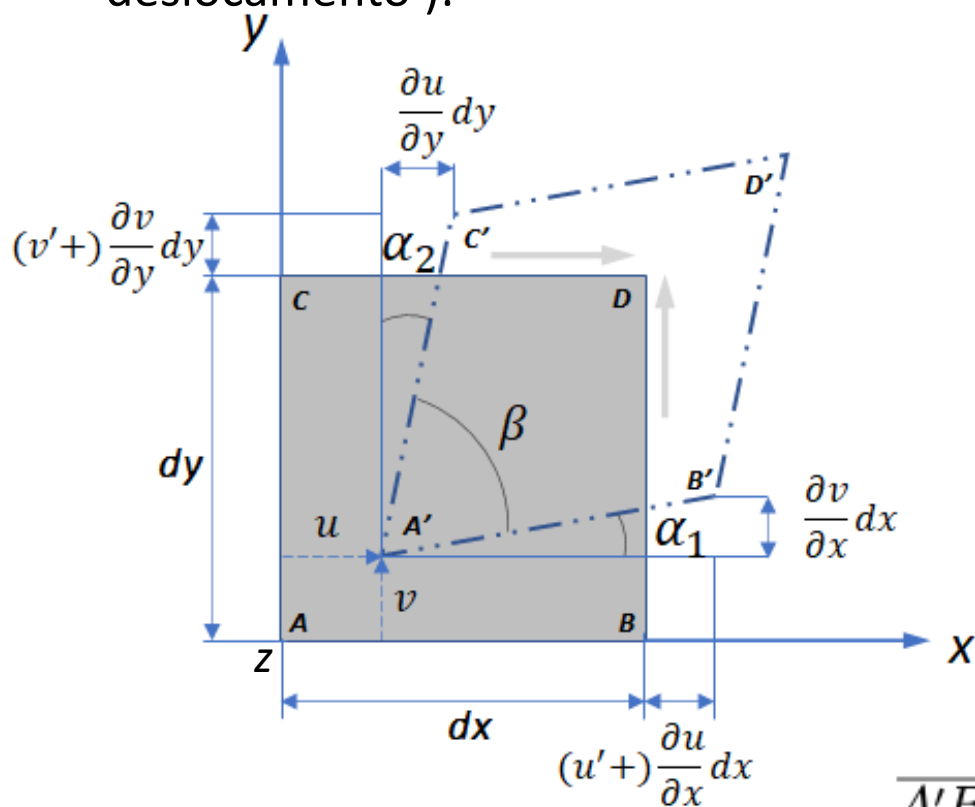
$$\epsilon = \frac{L - L'}{L} = \frac{\Delta L}{L}$$

A deformação por cisalhamento é definida como sendo a medida da alteração angular que ocorre no interior do corpo pela ação das tensões cisalhantes.



Componentes da Deformação

A partir da análise geométrica de um corpo de dimensões dx e dy , deformado por cisalhamento puro, e utilizando a aproximação da engenharia, temos - (onde u e v são funções componentes do gradiente de deslocamento):



A deformação normal ϵ na direção x é definida como:

$$\epsilon_x = \frac{\overline{A'B'} - \overline{AB}}{\overline{AB}}$$

Da geometria da Figura temos:

$$\begin{aligned}\overline{A'B'} &= \sqrt{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x}dx\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}dx\right)^2} \\ &= dx \sqrt{1 + 2\frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}\end{aligned}$$

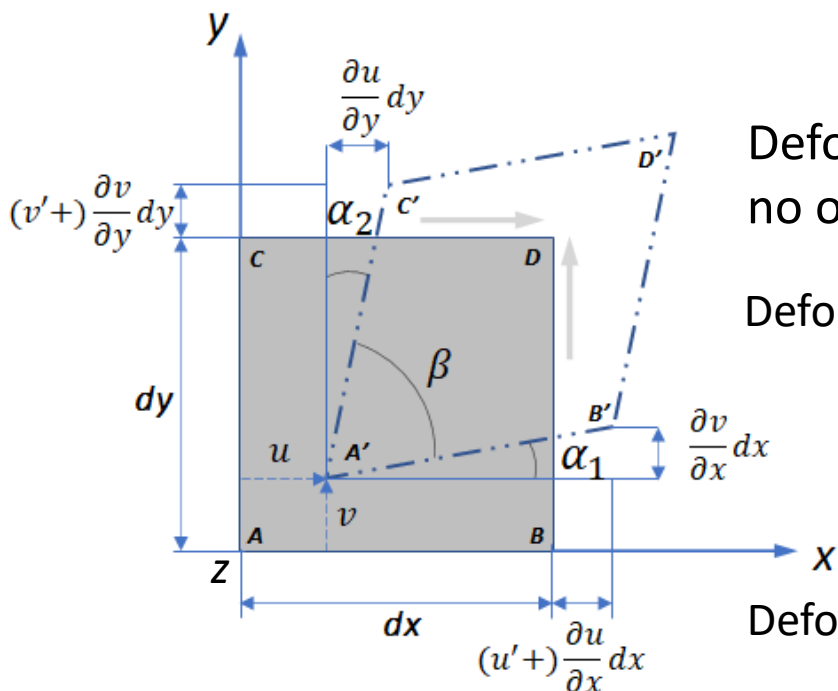
$$\overline{A'B'} \approx dx + \frac{\partial u}{\partial x}dx \quad \overline{AB} = dx, \quad \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$



Componentes da Deformação

COMPONENTES NORMAIS:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$



Deformações secundárias ocasionadas pela deformação normal de um eixo no outro eixo perpendicular, pode ser deduzida da seguinte forma:

Deformação secundária provocada no eixo y pela deformação normal do eixo x:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x}$$

Deformação secundária provocada no eixo x pela deformação normal do eixo y:

$$\varepsilon_{yx} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial u}{\partial y}$$



Componentes da Deformação

As demais deformações secundárias podem ser deduzidas da mesma maneira:

No plano x – y:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{yx} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial u}{\partial y}$$

No plano x – z:

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\frac{\partial w}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\frac{\partial u}{\partial z} dz}{dz} = \frac{\partial u}{\partial z}$$

No plano y – z:

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\frac{\partial w}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial w}{\partial y}$$

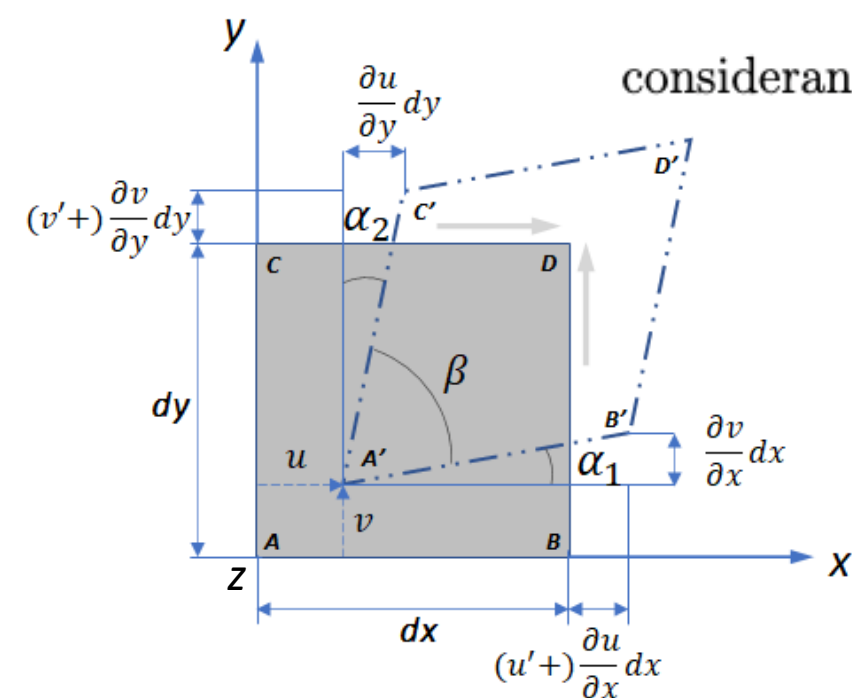
$$\varepsilon_{zy} = \frac{\frac{\partial v}{\partial z} dz}{dz} = \frac{\partial v}{\partial z}$$



Componentes da Deformação

COMPONENTES DE CISALHAMENTO

$$\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \beta = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (\text{Plano } x - y)$$



considerando pequenas rotações ($\alpha \ll 1 \text{ rad}$),

$$\frac{\partial v}{\partial x} \approx \alpha_1 \quad - \frac{\partial u}{\partial y} \approx \alpha_2$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 2\varepsilon_{xy} \quad *$$

Com derivações similares para as deformações ε_{xz} e ε_{yz} , chega-se a:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 2\varepsilon_{xz}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 2\varepsilon_{yz}$$

* Considerando-se material isotrópico



Componentes da Deformação

O Estado de deformação no cubo pode ser definido, então, por três deformações normais e três deformações cisalhantes, sendo escrito das seguintes formas:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \epsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Ou, ainda:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$



Tensor de Tensões e de Deformações

Notação Indicial

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix}$$



Exercícios Tensão / Deformação

- 1 – Uma amostra sólida e cilíndrica de rocha é testada em equipamento de ensaio à compressão para examinar seu comportamento tensão/deformação. A amostra possui 6" de diâmetro e 12" de comprimento, com célula de carga de compressão impõe uma carga constante de 10.000 lbf, igualmente tanto na parte superior quanto na parte inferior da amostra de rocha. Pressupondo uma redução de comprimento de 0,02", encontre a tensão de compressão e a deformação específica da rocha.
- 2 – Supondo uma barra metálica sob tração, com $l_0 = 200$ mm e $l_f = 220$ mm, determinar sua deformação .
- 3 – Um tubo de concreto suporta uma carga de compressão de 24,5 ton. Os diâmetros interno e externo são de 91 cm e 127 cm, respectivamente, e seu comprimento é de 100 cm. O encurtamento notado com a aplicação da carga foi de 0,056 cm. Determine a tensão de compressão axial e a deformação no cilindro. Considerações: o peso próprio do cilindro é desprezível e não há deformação por flambagem(deslocamento lateral).