



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

**PROJETO
ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM
ESCAVAÇÕES EM ROCHA**

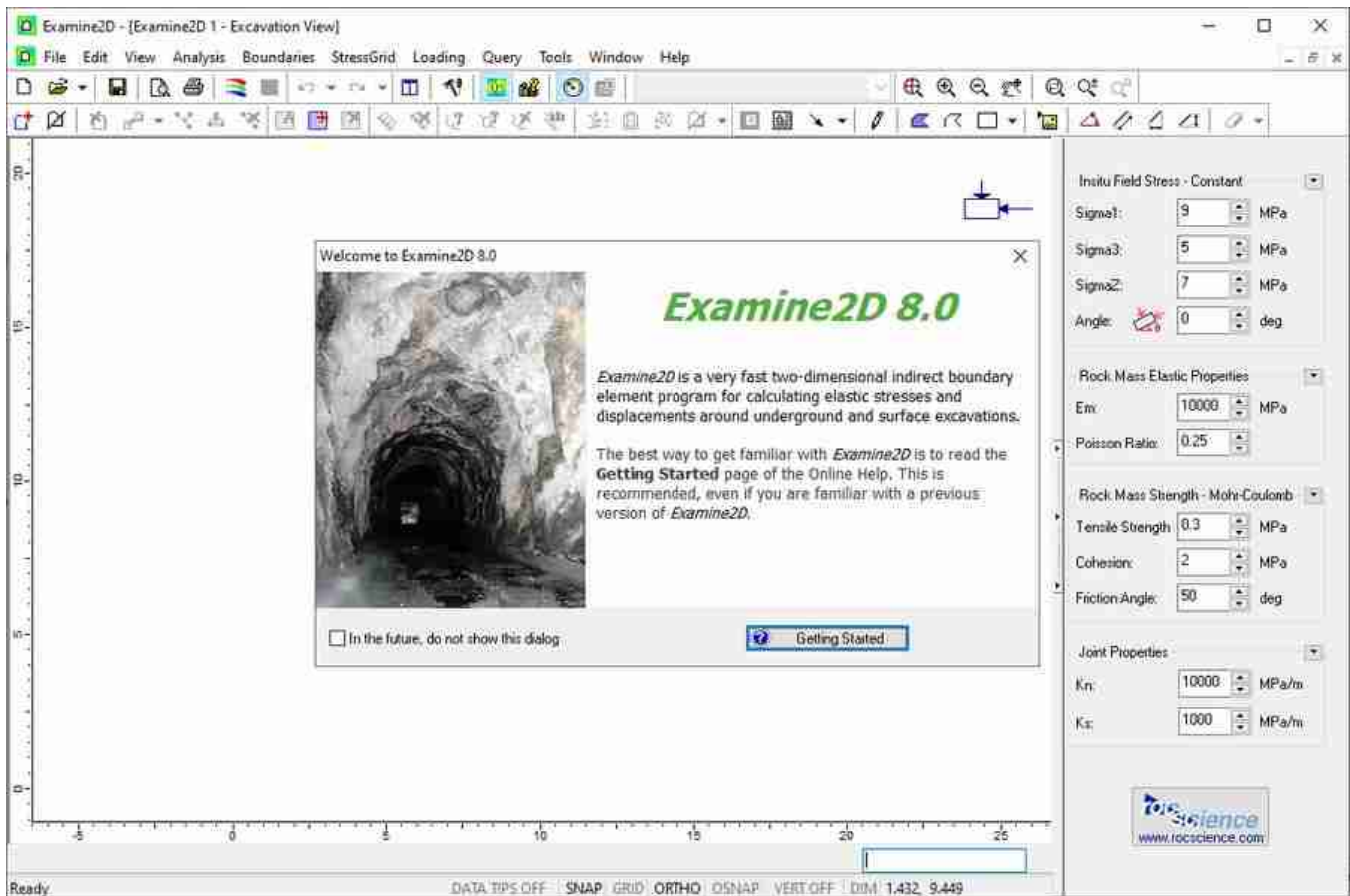
**PMI 3309 - Mecânica de Rochas Aplicada à Mineração II
Prof. Eduardo César Sansone**

PROJETO



**PROJETO
ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM ESCAVAÇÕES EM ROCHA**

**RECURSO
Programa Rocscience Examine2D.**



Tela do programa Examine2D 8.0

3



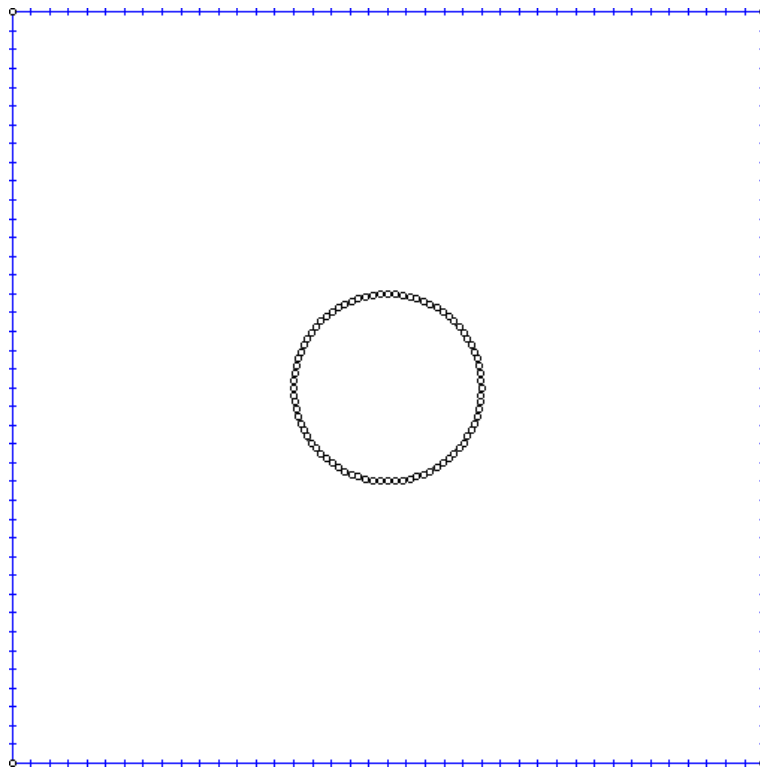
SIMULAÇÕES

Analisar a distribuição de tensões e de deformações na vizinhança de escavações subterrâneas, bem como, a condição de estabilidade (Fator de Segurança), para as seguintes situações:

1) Um túnel horizontal de seção circular escavado em maciço rochoso submetido ao seguinte estado de tensões in situ constante:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 10 \text{ MPa} \\ \sigma_3 &= 10 \text{ MPa} \\ \sigma_2 &= 10 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

4



SEQUÊNCIA DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS

Boundaries > Add Excavation (coordenadas ou i=circle)

e

StressGrid > Auto Stress Grid.

**SUGESTÃO DE SAÍDAS TÍPICAS A ANALISAR**

Sigma 1
Sigma 3
Total Displacement
Strength Factor
Display Deformation Vectors
Display Deformed Boundaries
Display Stress Trajectories
Query > Add Material Query
Query > Query Boundary
Query > Graph Material Queries
etc.

7



Comparar os resultados obtidos com o previsto pela Teoria da Elasticidade (σ_r , σ_θ e $\tau_{r\theta}$) no caso das seções circulares.

8



Distribuição de tensões no entorno de uma escavação circular em coordenadas polares, segundo a solução de Kirsch (1898) baseada na teoria da elasticidade para um meio contínuo, homogêneo e isotrópico:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta$$

Onde:

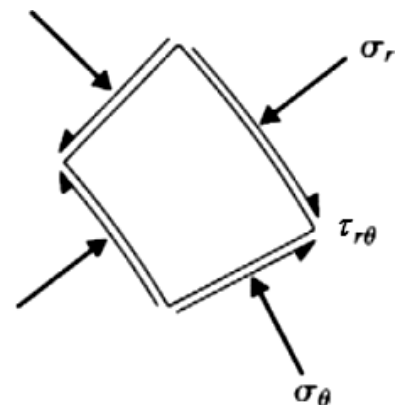
σ_x = tensão natural do maciço na direção X

σ_y = tensão natural do maciço na direção Y

a = raio da escavação

r = distância do ponto ao centro da escavação

θ = ângulo com a horizontal



9



A tensão tangencial atuante na borda da escavação será dada por:

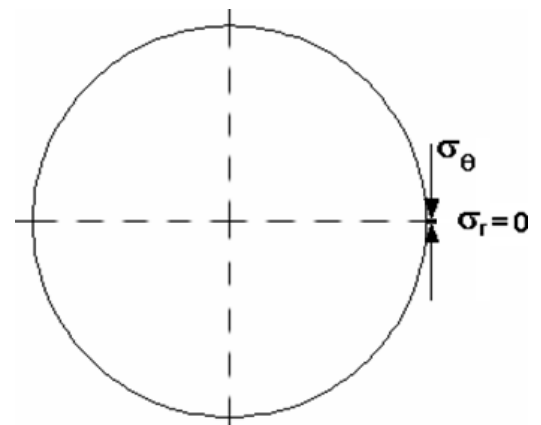
$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

Assim:

$$\sigma_\theta = \sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta$$

Na borda da escavação temos, também:

$$\sigma_r = 0 \quad \text{e} \quad \tau_{r\theta} = 0$$





2) Mesmo do item anterior para:

$$\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 10 \text{ MPa}$$

$$(\theta = 90^\circ).$$

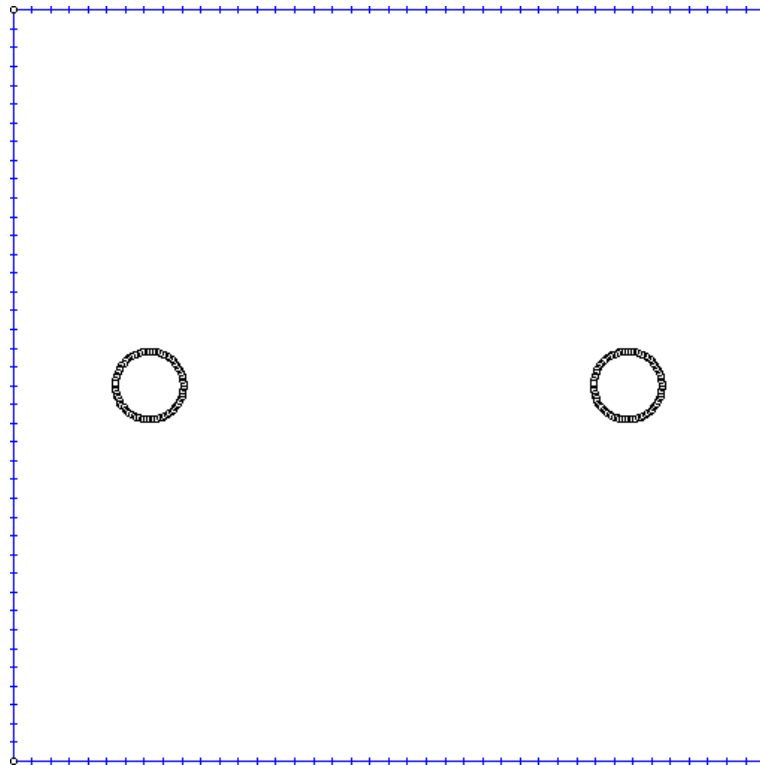


3) Dois túneis horizontais de seção circular, com distância entre as suas paredes laterais igual a doze vezes o raio de cada um, escavados em maciço rochoso submetido ao seguinte estado de tensões in situ constante:

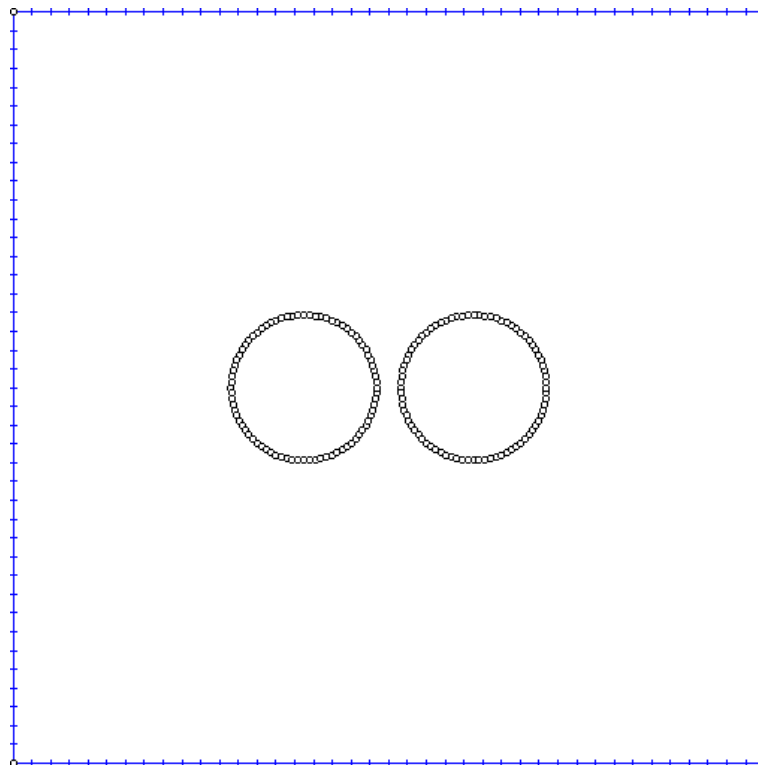
$$\sigma_1 = 40 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 40 \text{ MPa}$$



4) Mesmo do item anterior para distância entre as paredes laterais igual a um terço do raio.



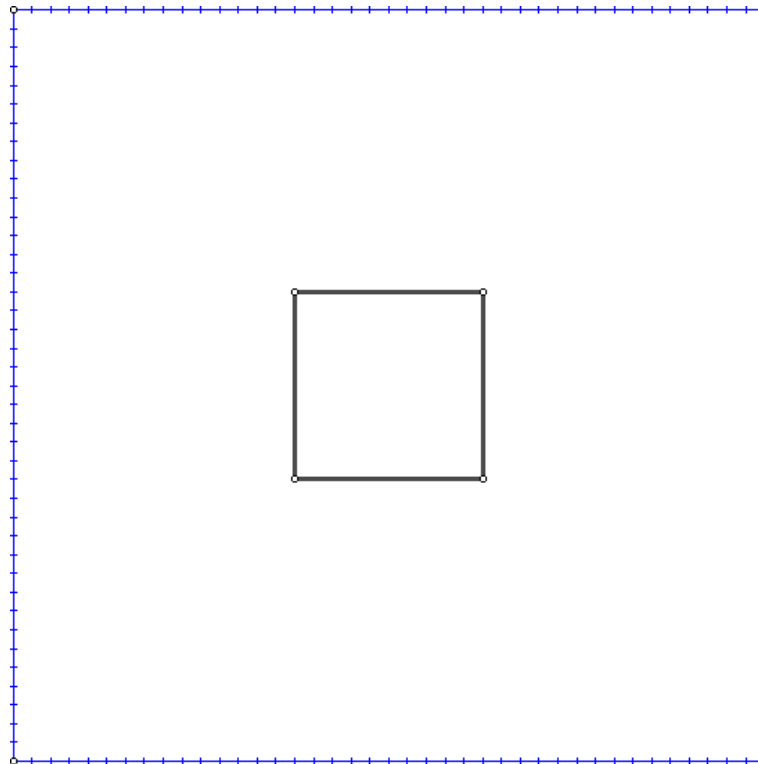
5) Um túnel horizontal de seção quadrada, escavado a 1500 m de profundidade em maciço rochoso submetido a um estado de tensões in situ gravitacional (Horizontal Stress Ratio = Out of Plane Stress Ratio = 0,333).

Tensões Gravitacionais:

$$\nu = 0,25$$

$$\sigma_v = \gamma \cdot Z$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v$$

**DADOS**

$\gamma = 0,023 \text{ MN/m}^3$ (peso específico da rocha)

$E = 25.000 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade da rocha)

$\nu = 0,26$ (coeficiente de Poisson da rocha)

$\sigma_T = 4 \text{ MPa}$ (resistência à tração da rocha)

$c = \left(5 + \frac{4}{9}X\right) \text{ MPa}$ (coesão da rocha) onde X é o último dígito do nUSP do aluno

(arredondar para 2 algarismos significativos)

$\varphi = \left(40 + \frac{5}{33}XX\right)^\circ$ (ângulo de atrito interno da rocha) onde XX são os 2 dígitos do nUSP do aluno (arredondar para 3 algarismos significativos)

$L = \left(3,5 + \frac{2}{9}X\right) \text{ m}$ (diâmetro dos túneis de seção circular ou lado do túnel quadrado)

onde X é o último dígito do nUSP do aluno (arredondar para 2 algarismos significativos)



RELATÓRIO

Entrega no e-Disciplinas da USP até o dia 29/11/2023.

ESTRUTURA

- Capa.
- Sumário.
- Introdução.
- Desenvolvimento.
- Conclusão.
- Bibliografia consultada.

FORMATAÇÃO

- Folha tamanho A4.
- Figuras, gráficos e tabelas com títulos.
- Numeração de páginas.

A avaliação do projeto será feita com base na correção dos resultados e na avaliação da qualidade do texto apresentado (descrição das análises e análise dos resultados).



OBRIGADO!

Contato:

Prof. Eduardo César Sansone

esansone@usp.br