



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

## **DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES NOS MACIÇOS ROCHOSOS PARTE 1**

**PMI3305 - Mecânica das Rochas Aplicada à Mineração I  
Prof. Eduardo César Sansone**

### **MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES NOS MACIÇOS ROCHOSOS**



#### **PRINCIPAIS MÉTODOS**

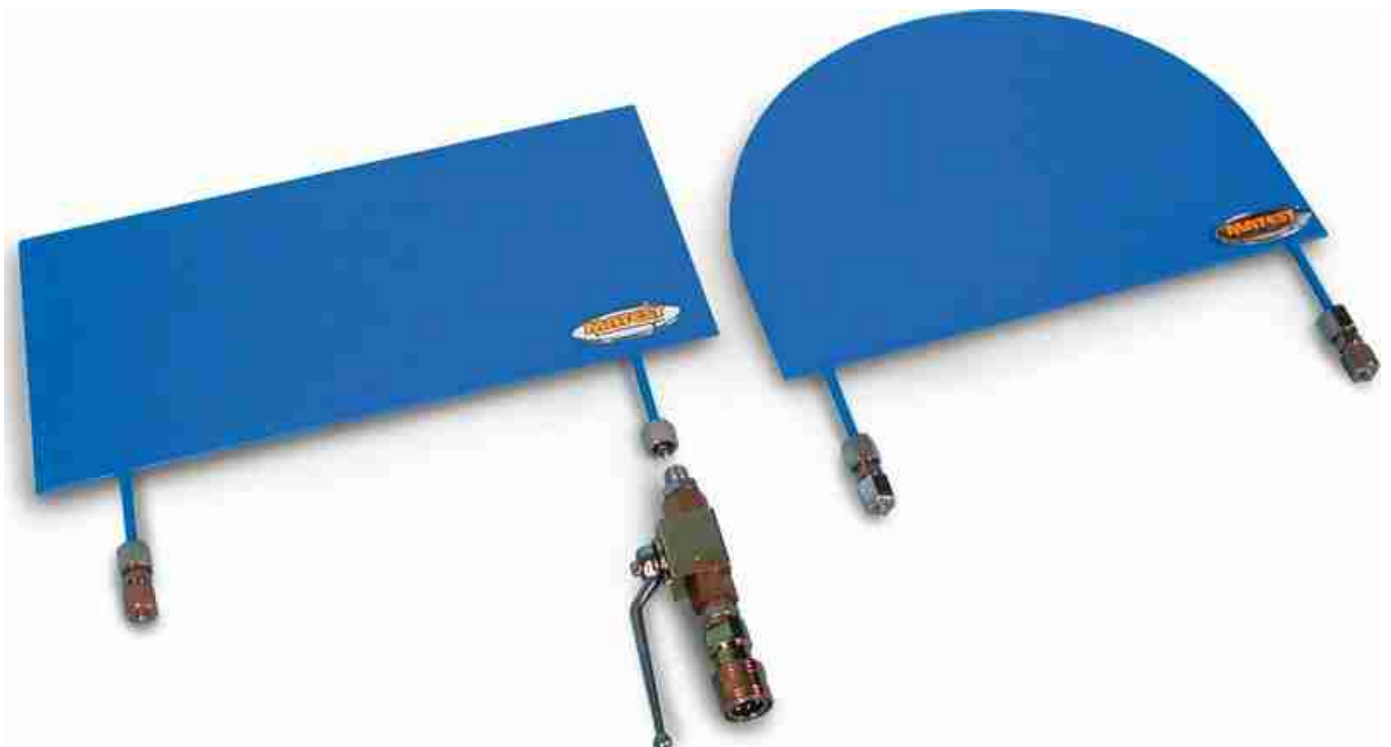
- Macaco Plano (Flat Jack) ⇒ Método de Pressurização
- USBM Overcoring Torpedo
- CSIRO Overcoring Gauge } ⇒ Métodos de Sobrefuração
- Fraturamento Hidráulico ⇒ Método de Pressurização



## MACACO PLANO (PRESSURIZAÇÃO)

3

## MACACO PLANO (FLAT JACK)



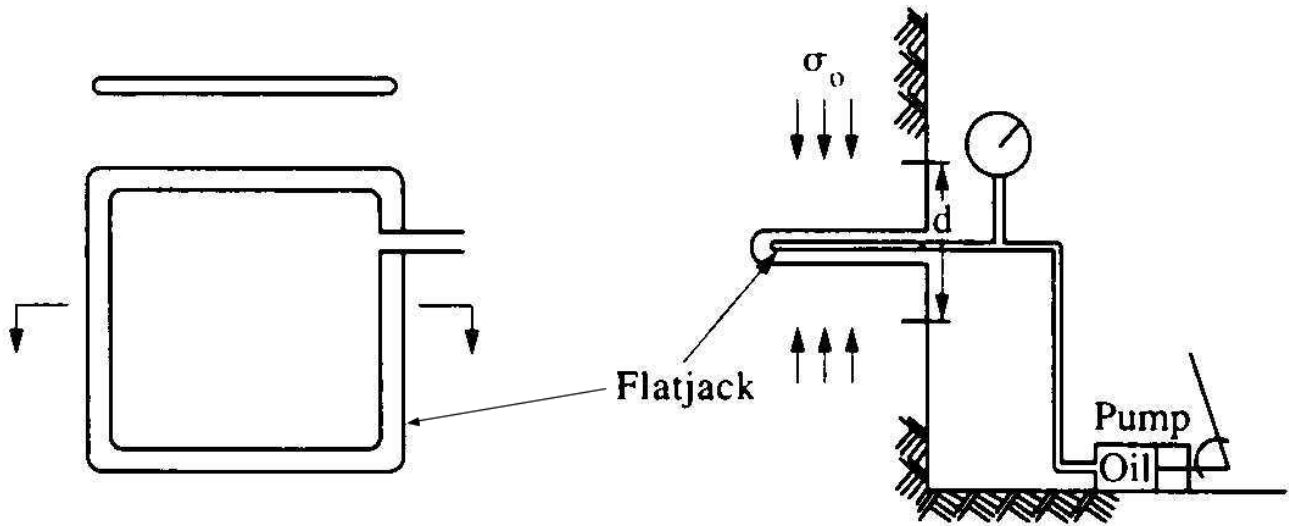
Equipamento

4

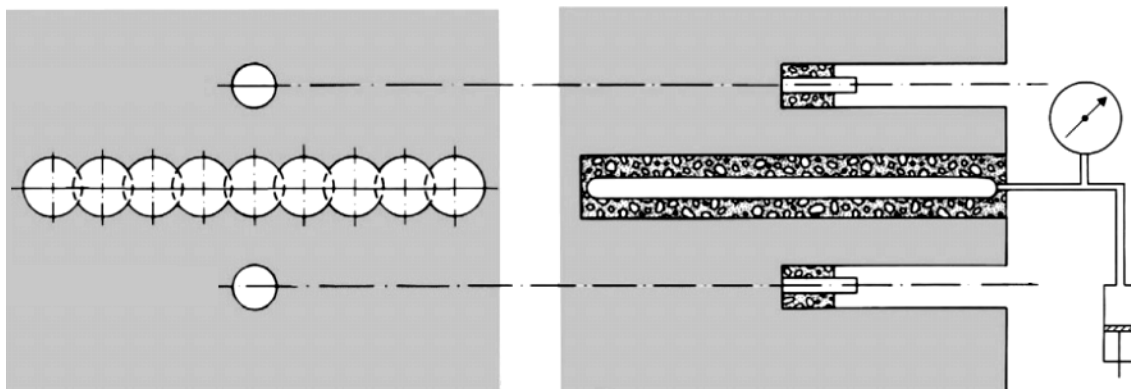
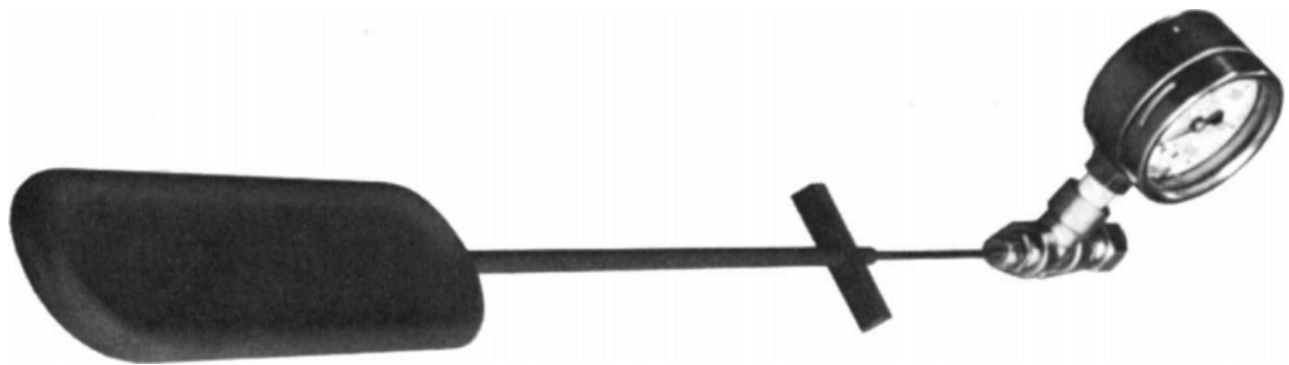


## Princípio

- Dois pinos são fixados na parede da escavação e medida a distância "d".
- Uma ranhura é escavada na direção perpendicular à linha entre os pinos.
- O macaco plano, que consiste em duas placas soldadas onde se aplica pressão com água ou óleo, é inserido na ranhura.
- A pressão aplicada deve fazer com que a distância entre os dois pinos retorne ao valor inicial.



5



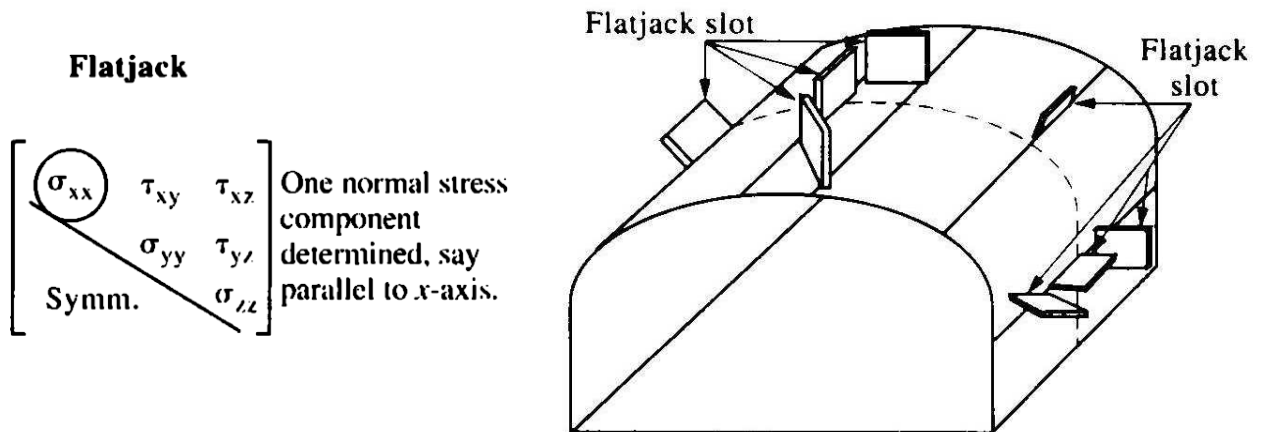
Equipamento

6



## Observações

- O macaco plano apenas mede a tensão atuante na direção perpendicular ao plano do equipamento.
- Para a determinação de todos os componentes de tensão devem ser realizadas medidas em diferentes posições.



7



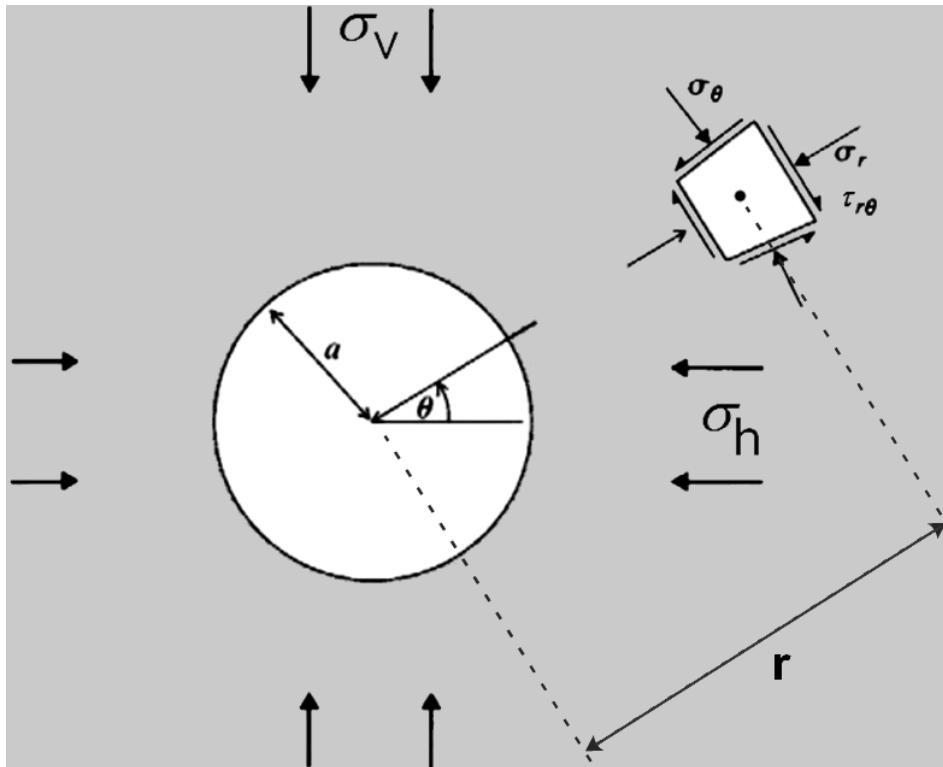
**As componentes de tensão determinadas a partir de ensaios com o Macaco Plano correspondem às tesões naturais atuantes no maciço rochoso?**

**Não, estas correspondem às tensões induzidas pela execução da escavação.**

8



As tensões resultantes da redistribuição das tensões naturais  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  no entorno de uma escavação circular podem ser determinadas resolvendo as equações da Teoria da Elasticidade expressas em coordenadas polares.

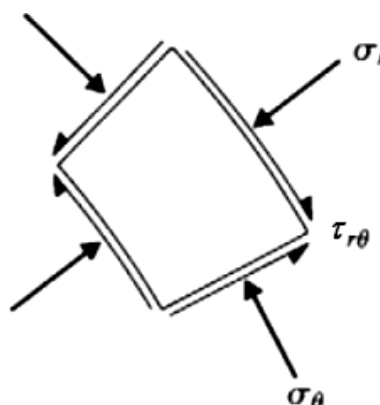


Tensão radial ( $\sigma_r$ ), tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ) e tensão de cisalhamento ( $\tau_{r\theta}$ ) atuantes em um ponto no entorno de uma escavação circular, segundo a Teoria da Elasticidade:

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

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

$$\tau_{r\theta} = \left( \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \right) \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \text{sen} 2\theta$$





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

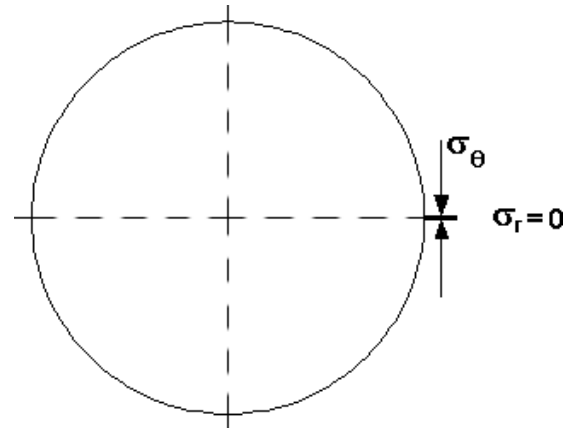
$$\sigma_{\theta} = \left( \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \right) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left( \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \right) \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

Assim:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_h + \sigma_v - 2(\sigma_h - \sigma_v) \cos 2\theta$$

Na borda da escavação temos, também:

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



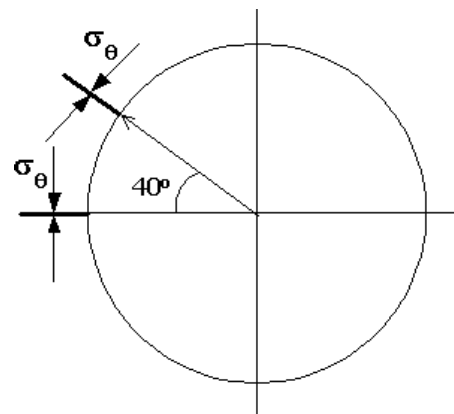
11

EXERCÍCIO



Um ensaio para a determinação das tensões atuantes em um maciço rochoso no entorno de uma escavação subterrânea circular de raio igual a 3 m, foi realizado com macaco plano e apresentou os seguintes resultados:

Posição do Macaco Plano (ângulo a partir da horizontal)	Tensão (MPa)
0°	36
40°	20



Determine  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  atuantes.

12



$$\sigma_{\theta} = \sigma_H + \sigma_V - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 2\theta$$

$$\left| \begin{array}{l} \theta = 0 \rightarrow \sigma_H + \sigma_V - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 0 = 36 \\ \theta = 40^\circ \rightarrow \sigma_H + \sigma_V - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 80 = 20 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \theta = 0 \rightarrow \sigma_H + \sigma_V - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 0 = 36 \\ \theta = 40^\circ \rightarrow \sigma_H + \sigma_V - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 80 = 20 \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left| \begin{array}{l} \sigma_H + \sigma_V - 2\sigma_H + 2\sigma_V = 36 \\ \sigma_H + \sigma_V - 0,347\sigma_H + 0,347\sigma_V = 20 \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left| \begin{array}{l} 3\sigma_V - \sigma_H = 36 \quad (\times 0,653) \\ 1,347\sigma_V + 0,653\sigma_H = 20 \end{array} \right. +$$

$$\hline 3,306\sigma_V = 43,508$$

$$\rightarrow \left| \begin{array}{l} \sigma_V = 13,16 \text{ mPa} \\ \sigma_H = 3,48 \text{ mPa} \end{array} \right.$$



**OBRIGADO!**

**Contato:**  
**Prof. Eduardo César Sansone**  
**[esansone@usp.br](mailto:esansone@usp.br)**