



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

**DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES
ATUANTES NOS MACIÇOS ROCHOSOS
PARTE 4**

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



FRATURAMENTO HIDRÁULICO (PRESSURIZAÇÃO)

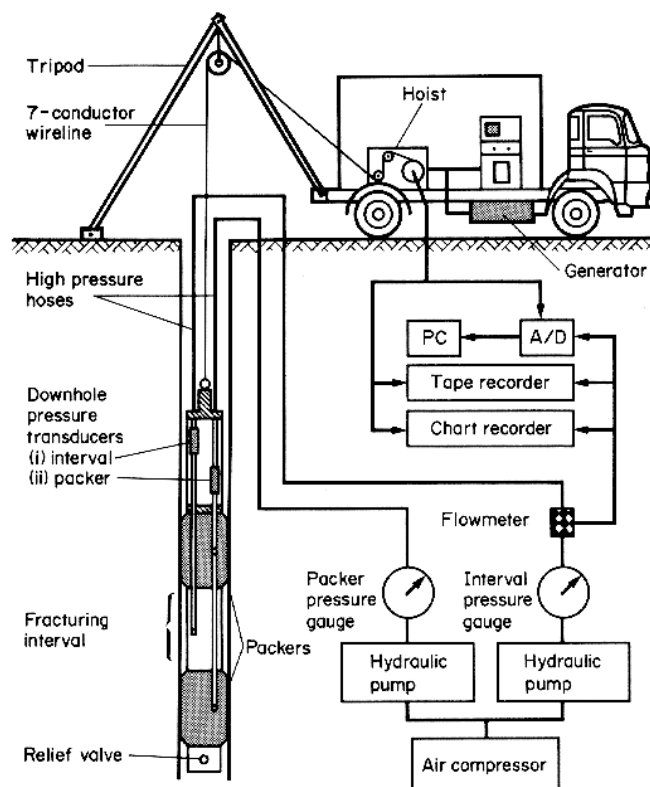


PROCEDIMENTO

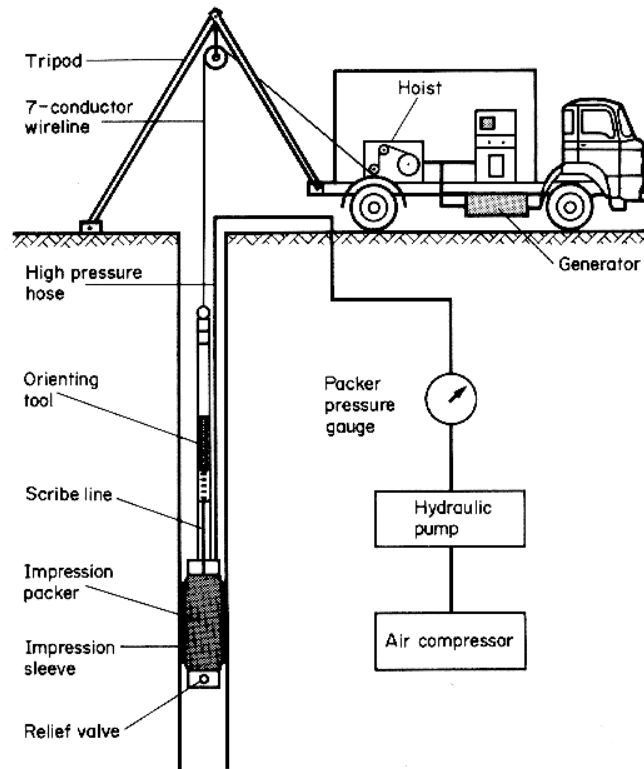
- Uma porção de um furo (~1m) é isolada por um sistema que não permite o vazamento de água ("straddle packer system").
- A porção isolada é pressurizada com água até ocorrer a fratura.
- São medidas duas pressões:
 Pressão quando se inicia a fratura, p_b ("breakdown pressure").
 Pressão necessária para manter a fratura aberta, p_s ("shut-in pressure").
- Um dispositivo mede a orientação e localização da fratura aberta.

Observações:

- A porção isolada do furo não deve conter fraturas.
- É o único método de medição direta das tensões principais.
- Pode ser realizado em qualquer profundidade ou distância da abertura.



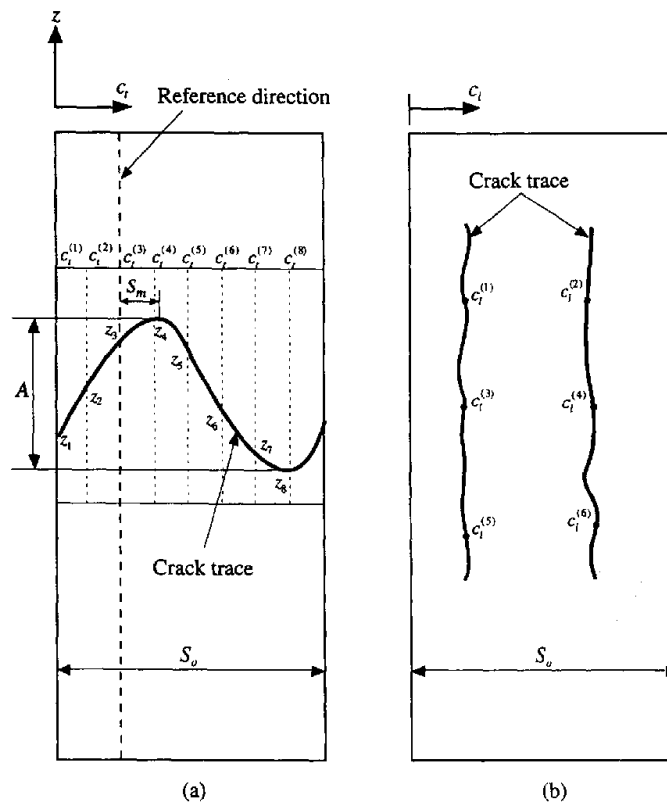
Equipamento utilizado para ensaios de fraturamento hidráulico



Equipamento utilizado para identificação da direção da fratura

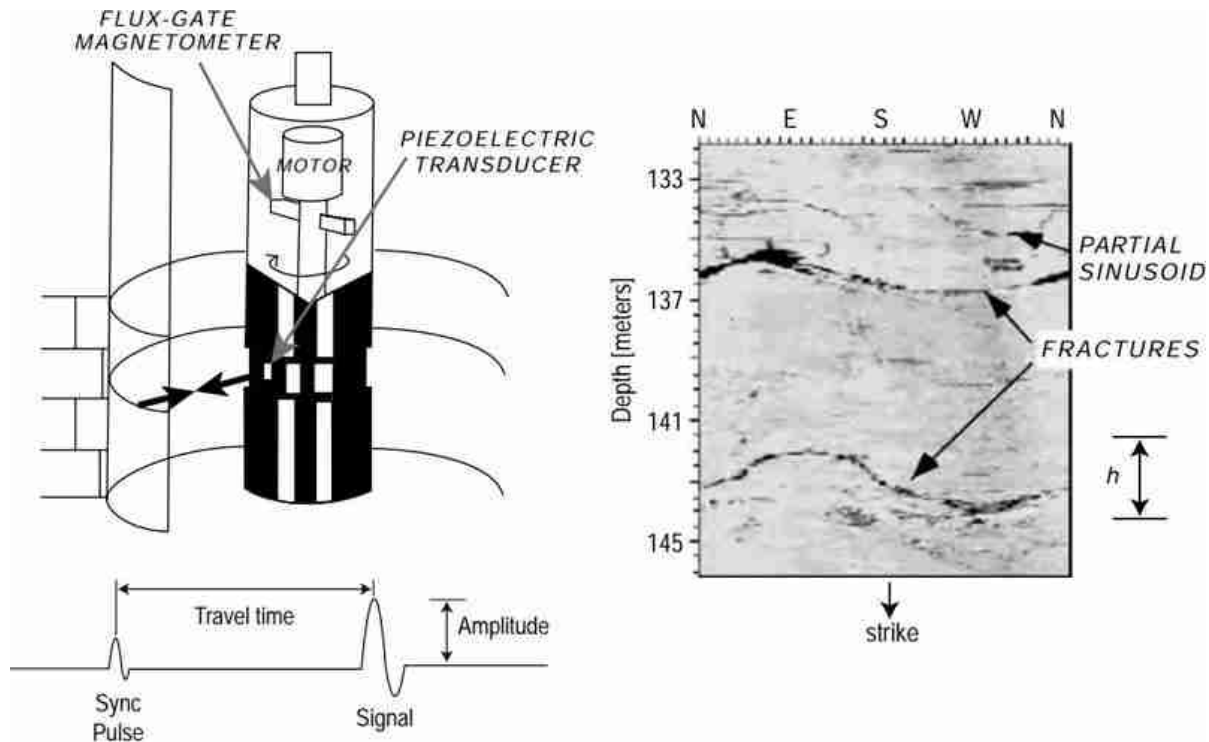
5

F. H. - IDENTIFICAÇÃO DA DIREÇÃO DA FRATURA PRODUZIDA



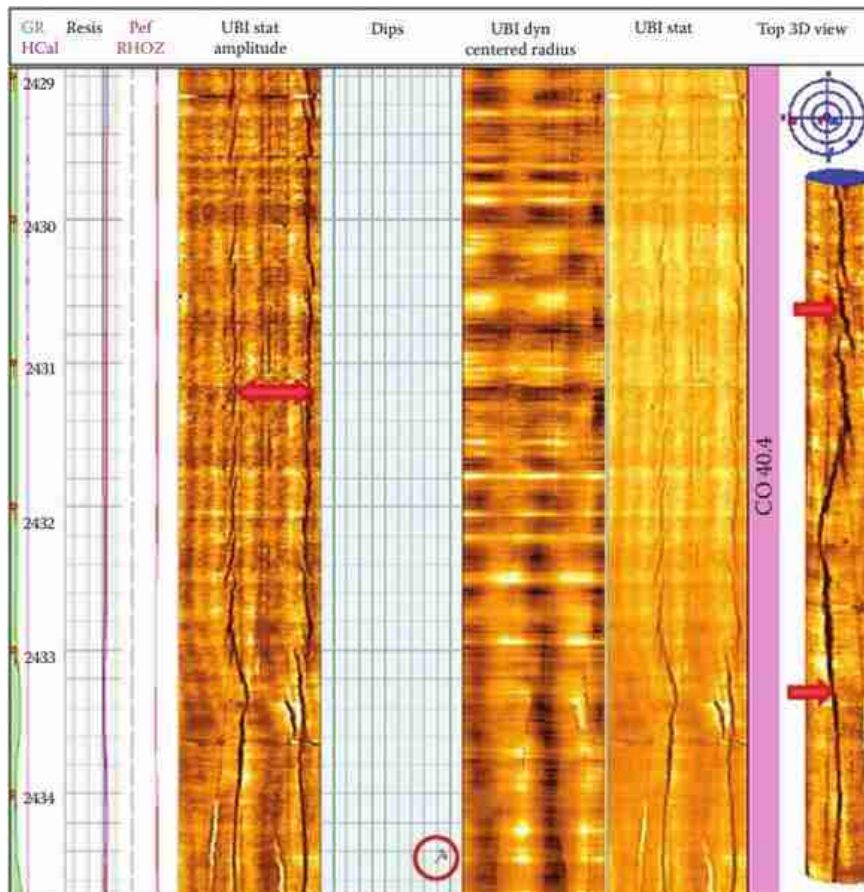
Impressão da direção da fratura em manta de borracha sensível

6



Perfilagem por Ultrasonic Borehole Televiewer (BHTV - Schlumberger)

7



Mapeamento da parede do poço

8

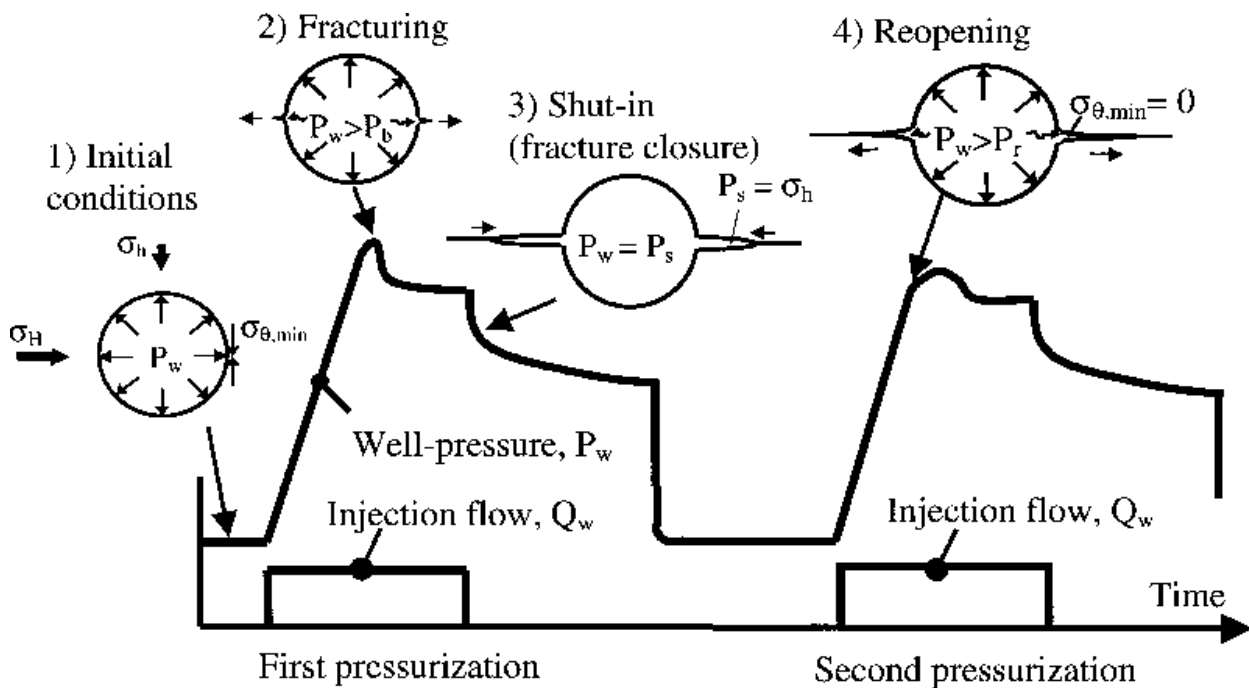


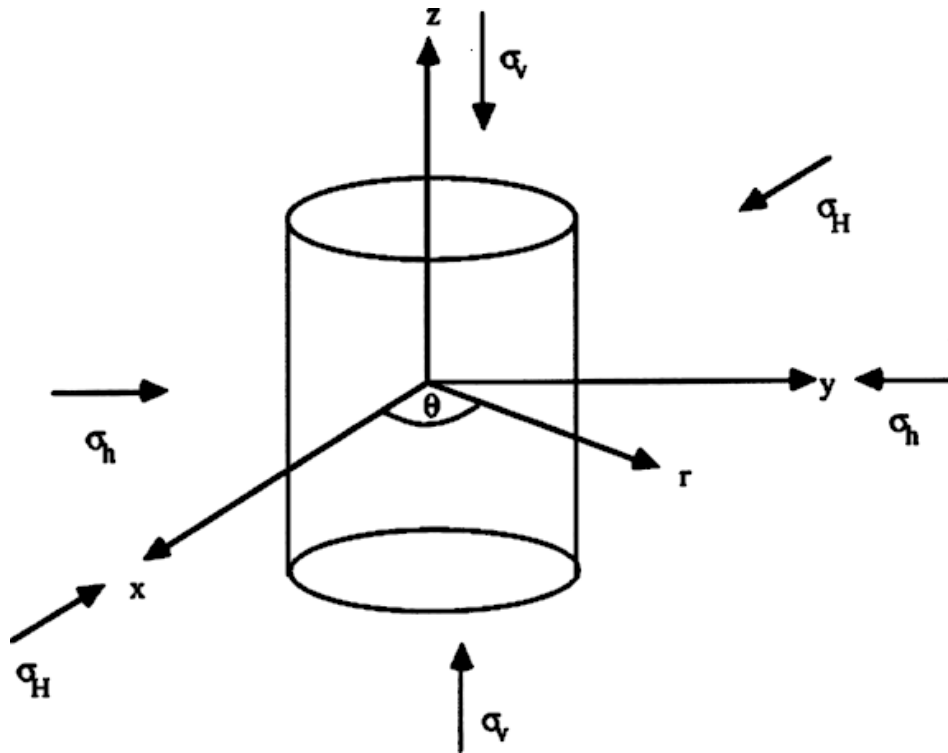
Gráfico Pressão x Tempo



O método clássico de tratamento de resultados se baseia na solução de Kirsch para a distribuição de tensões no entorno de uma abertura circular.

Características básicas:

- A rocha apresenta comportamento elástico, isotrópico, homogêneo e é livre de fraturas.
- A tensão principal maior é paralela ao eixo do furo. Para furos verticais, normalmente, corresponde ao carregamento devido ao capeamento ($\sigma_v = \gamma z$).
- A fratura se inicia quando a tensão tangencial atinge a resistência à tração da rocha.



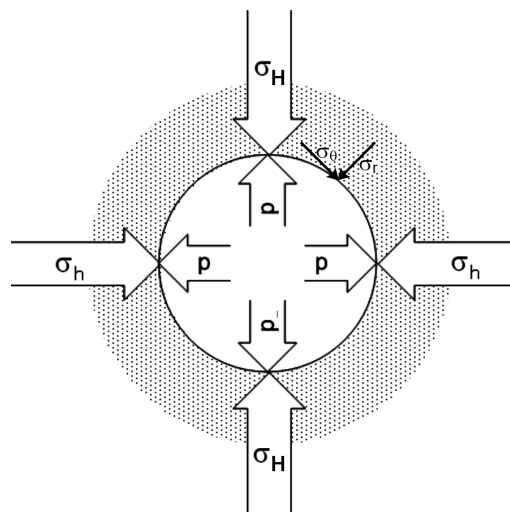
Sistema de coordenadas ligado ao furo



Se o furo for vertical e as tensões principais forem dadas pela tensão vertical σ_v , coincidente com o eixo z, e pelas tensões horizontais σ_H e σ_h (com $\sigma_H > \sigma_h$), coincidentes com os eixos x e y, as tensões ficarão:

$$\sigma_r = p$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - p$$





A tensão tangencial máxima será dada por:

$$\sigma_{\theta \text{ MAX}} = 3\sigma_h - \sigma_H - p$$

A fratura se iniciará quando a pressão p atingir seu valor crítico p_b ("breakdown pressure") que faz $\sigma_{\theta \text{ MAX}}$ se igualar à resistência à tração da rocha σ_T :

$$\sigma_{\theta \text{ MAX}} = -\sigma_T$$

Assim:

$$p_b = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_T$$



Subtraindo a contribuição da pressão de poros p_0 teremos:

$$p_b = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_T - p_0$$

As pressões necessárias para manter a fratura aberta p_s ("shut-in pressure") e para reabertura da fratura p_r serão dadas por:

$$p_s = \sigma_h$$

$$p_r = 3\sigma_h - \sigma_H - p_0$$

Portanto:

$$\sigma_H = 3p_s - p_r - p_0$$

$$\sigma_h = p_s$$

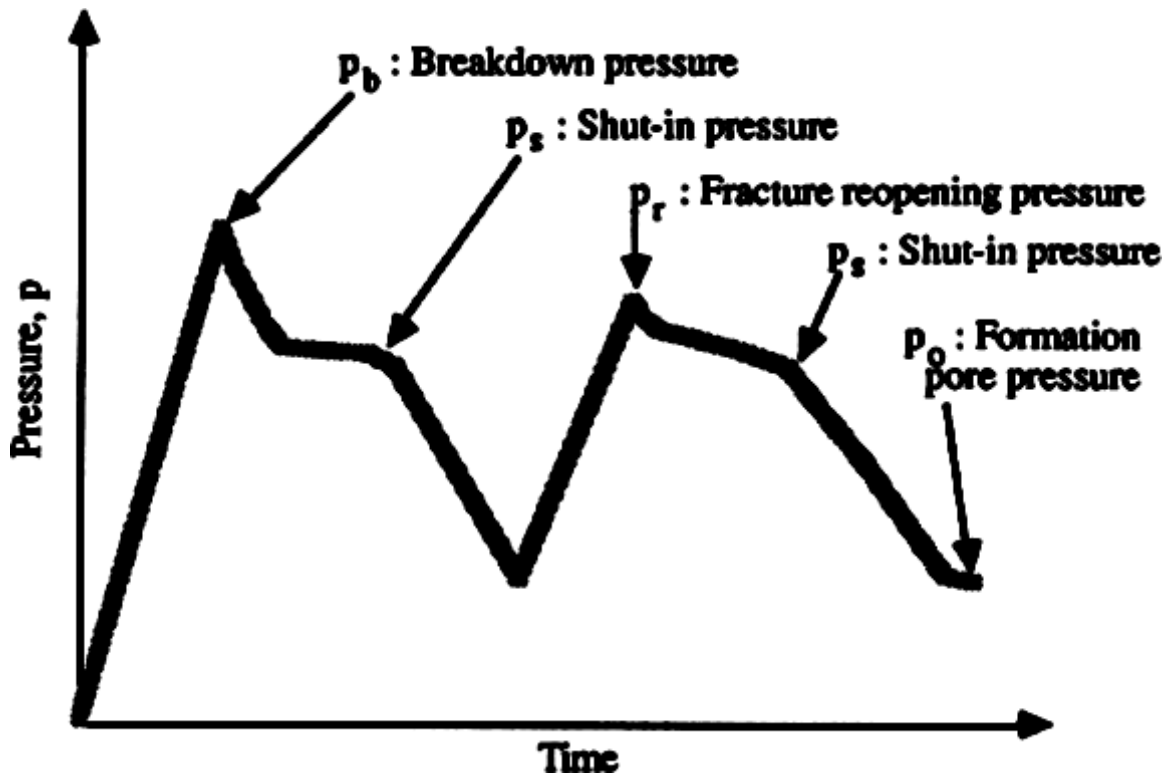


Gráfico Pressão x Tempo

15



O método do fraturamento hidráulico tem obtido grande sucesso no meio técnico e tem demonstrado resultados consistentes quando comparado a outras metodologias.

Dificuldades principais:

- Dificuldades na identificação da direção da fratura produzida.
- Furos com desenvolvimento de fraturas na direção de planos de fraqueza da rocha.
- Furos que atravessam regiões altamente fraturadas, como zonas de falha.
- Furos em regiões submetidas a altas temperaturas.

Mesmo assim o fraturamento hidráulico tem sido amplamente utilizado, fornecendo respostas confiáveis na determinação de, pelo menos, a tensão principal menor através do registro de p_s ("shut-in pressure").

16



BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock mechanics for underground mining. London, Chapman & Hall, 1994.

GOODMAN, R. E. Introduction to rock mechanics. New York, Wiley, 1980.

HUDSON, J. A. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. New York, Pergamon, 2005.



OBRIGADO!

**Contato:
Prof. Eduardo César Sansone
esansone@usp.br**