



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

**DIMENSIONAMENTO DE PILARES  
EM MINAS SUBTERRÂNEAS  
PARTE 2**

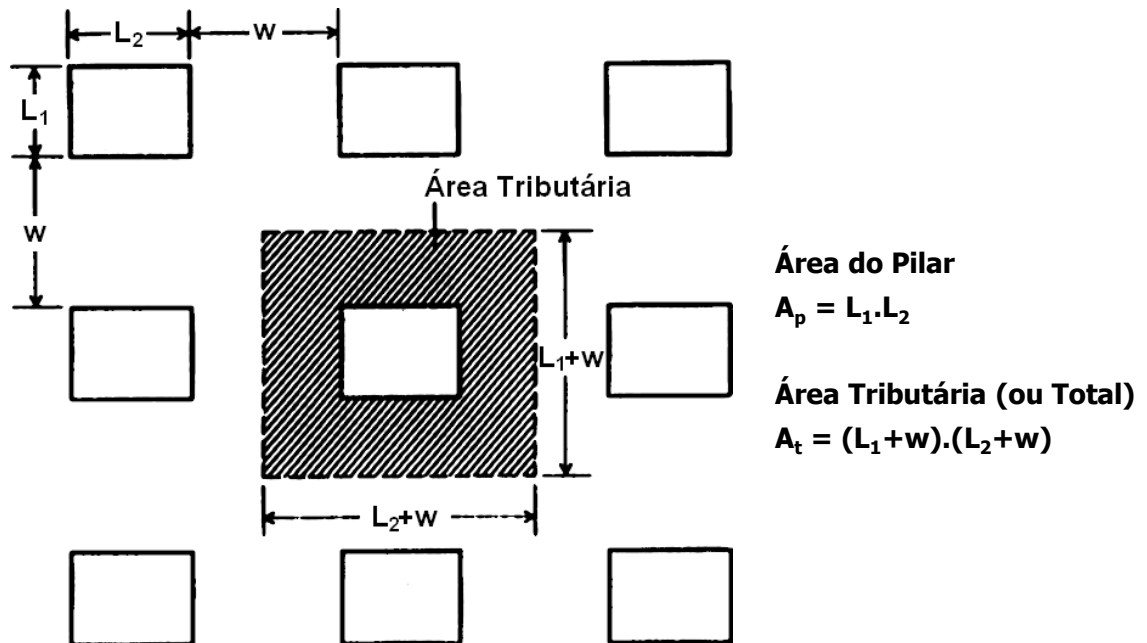
**PMI 3309 - Mecânica de Rochas Aplicada à Mineração II  
Prof. Eduardo César Sansone**



**CRITÉRIO DA ÁREA TRIBUTÁRIA**



O CRITÉRIO DA ÁREA TRIBUTÁRIA se baseia na consideração de que cada pilar é responsável pela sustentação do maciço acima de si e mais metade do vão livre entre ele e os demais, em todas as direções.



O pilar deve apresentar resistência suficiente para suportar as tensões impostas, dado um determinado fator de segurança.



A Recuperação (R) do minério será dada por:

$$R = \frac{A_t - A_p}{A_t} = 1 - \frac{A_p}{A_t}$$

Onde:

$A_t$  = área total

$A_p$  = área do pilar



A Tensão Atuante sobre o Pilar ( $\sigma_p$ ) será dada por:

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{A_t}{A_p}$$

Onde:

$\sigma_v$  = tensão vertical natural

$A_t$  = área total

$A_p$  = área do pilar

$A_t > A_p$  assim  $\sigma_p > \sigma_v$



O cálculo da Área do Pilar deve ser feito definindo-se um Fator de Segurança adequado para o projeto:

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Solicitantes}}$$

ou

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Resistência da Rocha}}{\text{Tensão no Pilar}}$$



## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DAS ROCHAS

7

## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DAS ROCHAS



A resistência da rocha mobilizada é a resistência a compressão uniaxial  $\sigma_c$ .



8



## ENSAIO NORMALIZADO EM PRENSA HIDRÁULICA



Prensa Hidráulica



Corpo de Prova

9



### EQUIPAMENTO

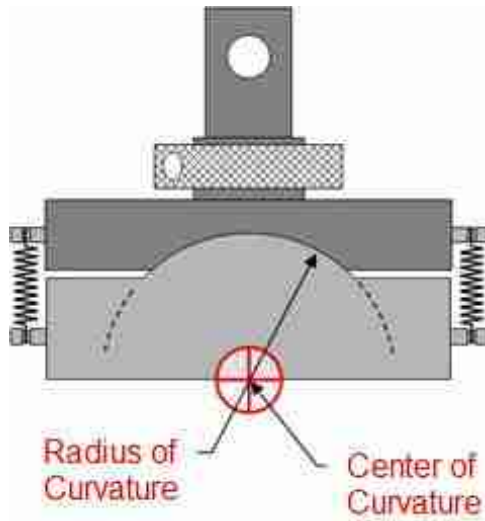
- Prensa hidráulica.
- Utilização de assento esférico.

### CORPO DE PROVA

- Cilíndrico.
- Diâmetro de 2" ou do testemunho de sondagem padrão NX ( $\phi = 54,7$  mm).
- Relação H/D ente 2 e 3.
- Desvio angular máximo admissível de 3,5'.
- Erro de planicidade máximo admissível de 0,02 mm.

### ENSAIO

- Velocidade de carregamento de 0,5 a 1 MPa/s.
- Maior tensão aplicada ao corpo de prova  $\Rightarrow \sigma_c$



**Assento Esférico**



**Ensaio de Compressão  
Uniaxial em Rocha**



## EFEITO DE FORMA

O Efeito de Forma sobre a Resistência à Compressão Uniaxial da rocha relaciona a variação da resistência com a esbeltez da amostra ou a relação D/H, pois os pilares de rocha nas minas possuem normalmente relação D/H diferente da dos corpos de prova utilizados nos ensaios em laboratório.

Efeito de Forma  $\Rightarrow$  Efeito da Relação D/H

13



1876, Baushinger:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,778 + 0,222 \frac{D}{H}$  (arenito)

1911, Bunting:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,7 + 0,3 \frac{D}{H}$  (carvão)

1941, Greenwald:  $\sigma_p = 2800 D^{1/2} H^{-5/6}$  (carvão)

1967, Salamon and Munro:  $\sigma_p = 1322 D^{0,46} H^{-0,66}$  (carvão)

1968, Bieniawski:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,645 + 0,355 \frac{D}{H}$  (carvão)

1989, Ayres da Silva:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,34 + 0,66 \frac{D}{H}$  (manganês)

1992, Ayres da Silva:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,615 + 0,385 \frac{D}{H}$  (basalto)

1996, Sansone:  $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = 0,922 - 0,078 \frac{D}{H}$  (calcário)

14



## EFEITO DE ESCALA

O Efeito de Escala sobre a Resistência à Compressão Uniaxial relaciona a variação da resistência com o tamanho da amostra ( $D$ ), pois os pilares de rocha nas minas possuem volume muito maior que os dos corpos de prova utilizados em laboratório e portanto apresentam mais descontinuidades que tendem a enfraquecer o material.

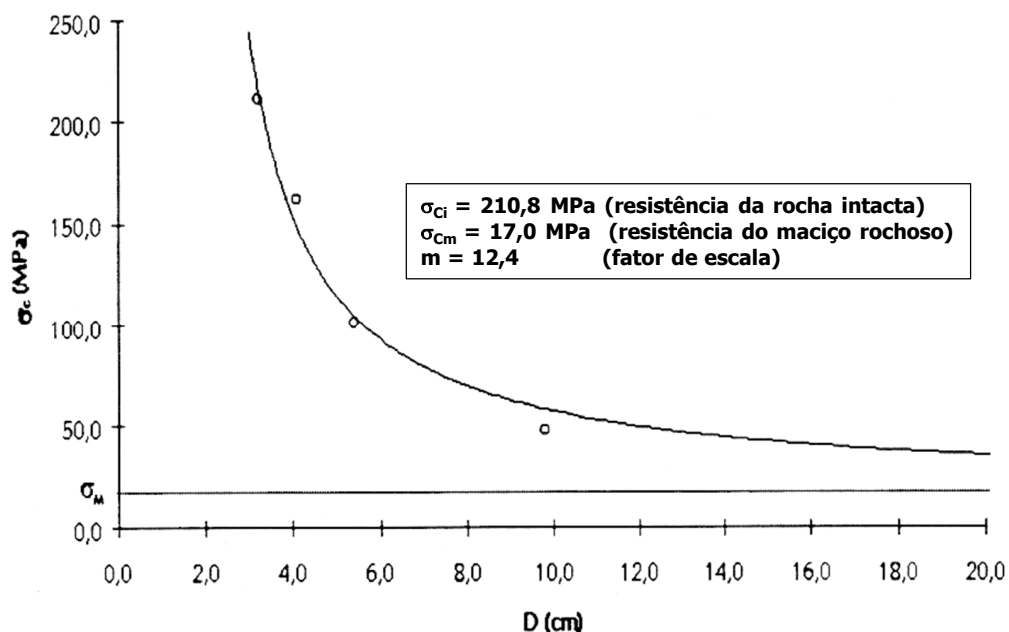
Escala de Laboratório  $\Rightarrow$  Escala do Maciço Rochoso  
Volume do Corpo de Prova  $\Rightarrow$  Volume do Pilar

15



## EXEMPLO

Ensaio realizado sobre amostras do calcário calcítico lavrado na Mina Baltar em Votorantim - SP.



Efeito de escala sobre a resistência à compressão uniaxial

16





O critério de ruptura de Hoek & Brown fornece uma metodologia para a determinação da resistência à compressão uniaxial do maciço  $\sigma_{cm}$  dada por:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} S^a$$

Onde:

$\sigma_{ci}$  = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

s e a = constantes características do tipo de maciço rochoso e da litologia

17



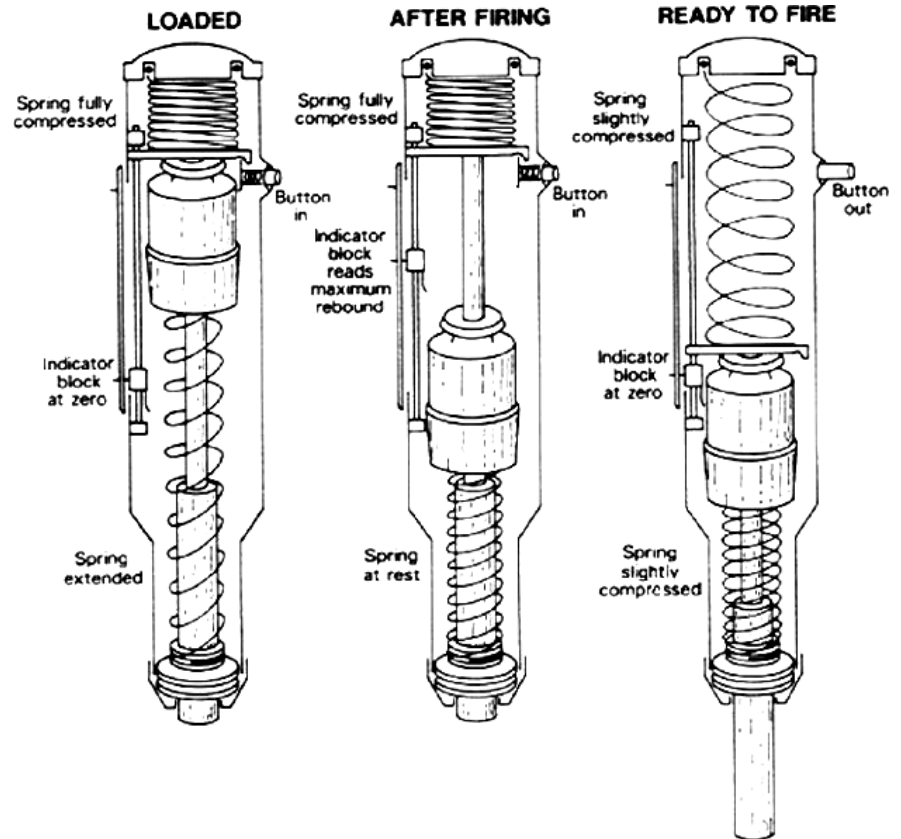
Método baseado na determinação da dureza superficial de paredes ou blocos de rocha.



**Martelo Schmidt**

18

# RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DAS ROCHAS MARTELO SCHMIDT



Princípio de funcionamento do martelo Schmidt

19

# RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DAS ROCHAS COMPRESSÃO PONTUAL (POINT LOAD TEST)



Ensaio com o Point Load Test

20



## FATOR DE SEGURANÇA DE UM PILAR

21

## FATOR DE SEGURANÇA DE UM PILAR



O Fator de Segurança de um pilar será dado por:

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Solici tan tes}} = \frac{\text{Resistência da Rocha}}{\text{Tensão no Pilar}}$$

Ou

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Efeito de Forma} \Rightarrow \sigma_{Ci} \leftarrow \text{Efeito de Escala}}{\sigma_v \frac{A_t}{A_p}}$$

Onde:

$\sigma_{Ci}$  = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

$\sigma_v$  = tensão vertical natural

$A_t$  = área total

$A_p$  = área do pilar

22



**BROWN, E. T. Rock characterization testing and monitoring: ISRM suggested methods. Oxford, Pergamon, 1981.**

**HUDSON, J. A. et al. Comprehensive rock engineering: principles, practice & projects. Oxford, Pergamon, 1993.**

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

**OBERT, L.; DUVALL, W. I. Rock mechanics and the design of structures in rock. New York: Wiley, 1967.**



**OBRIGADO!**

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