

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE PILARES EM MINAS*

Contribution to the study of the behaviour of support pillars in mines

por
M. BARROSO**
L. LAMAS***

RESUMO — Este trabalho apresenta o estudo em escala laboratorial das características de deformação e resistência de pilares de suporte em minas. Foram utilizados modelos de pilares em escala reduzida, talhados de tal maneira que nos ensaios de compressão uniaxial com uma máquina de ensaio servo-controlada não havia influência dos contactos entre os pratos da máquina e os provetes de ensaio. Para investigar a influência de vários parâmetros nos resultados foi realizada uma análise numérica.

SYNOPSIS — This paper presents a study, on laboratory scale, of the deformation and strength characteristics of mine support pillars.

The experimental approach used small-scale models of the pillars, shaped in such a way that the uniaxial compression tests, with a very stiff servo-controlled testing machine, were not affected by the contacts between the testing machine and the specimens. An elastic numerical analysis was carried out, in order to investigate the influence of some parameters on the pillar stability.

1 — INTRODUÇÃO

A utilização de pilares com múltiplas funções em minas subterrâneas é praticamente generalizada. Particularmente, quando os pilares desempenham a função de suporte principal dos tectos, apesar de o progresso dos conhecimentos na mecânica das rochas já permitir abordar o projecto racional desses pilares, ainda se justifica o prosseguimento da investigação dos mecanismos que condicionam o comportamento dos pilares desde que entram em carga até à rotura.

Do ponto de vista da mecânica das rochas, o projecto de pilares de suporte procura que as suas dimensões e as dos vãos sejam suficientes para que não ocorram roturas durante o tempo desejado. O seu projecto exige uma análise quantitativa detalhada das condições de rotura resultantes da interacção da matriz complexa de parâmetros que condicionam o projecto global da mina. Esta matriz tem características dinâmicas que se transmitem ao factor de segurança dos pilares de acordo com o desenvolvimento mineiro que introduz muitas vezes alterações na distribuição de esforços nos suportes.

Este trabalho apresenta a questão global do projecto de pilares de suporte em minas, o estudo do comportamento de modelos de pilares com base em aproximações matemáticas e em técnicas experimentais com uma rocha xistosa metamórfica de uma mina de volfrâmio explorada por um método que utiliza frequentemente pilares sobrecarregados.

*Apresentado no 6.º Congresso de ISRM, Montreal, 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

**Engenheiro de Minas, Investigador-Coordenador do LNEC.

***Engenheiro Civil, Assistente de Investigação do LNEC.

O estudo experimental recorreu a modelos de pilares esculpidos de tal forma que as condições de deformação e rotura não eram afectadas pelos contactos entre a máquina de ensaio e os provetes ensaiados. Além disso, estes ensaios foram conduzidos numa prensa servo-controlada de grande rigidez, com capacidade para velocidades de deformação bastante reduzidas.

Foram analisados em particular os efeitos das relações dimensionais dos pilares (relação largura/altura) nas curvas carga/deformação, incluindo a região para além da resistência de pico, onde têm uma inclinação negativa.

A análise numérica foi realizada utilizando um modelo tridimensional de elementos de fronteira elástico linear, com o objectivo de investigar quais as zonas que apresentam tendência a ceder em primeiro lugar e a influência do coeficiente de Poisson e da relação largura/altura na estabilidade dos pilares.

2 — ESTUDO EXPERIMENTAL

O objectivo básico do estudo foi a simulação experimental em laboratório das condições de trabalho usuais em pilares de suporte em minas bem assim como uma aproximação teórica, de modo a contribuir para o conhecimento do comportamento dos pilares de minas, em particular na região pós-elástica e até ruína completa.

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos numa máquina de ensaio servo-controlada de 4000 kN e rigidez de 10^{10} N/m. O equipamento electrónico dispõe de três controladores de três variáveis de controle diferentes: posição do êmbolo da máquina, deslocamento axial e carga axial. A informação saída alimenta registadores X-Y os quais dão a curva carga-deformação do provete em ensaio de acordo com as condições definidas por um gerador de rampa cujos sinais variam monotonicamente com o tempo.

As diferentes propriedades do material das placas da máquina de ensaio e da rocha induzem os conhecidos efeitos dos topos, os quais influenciam os resultados dos ensaios. Para ultrapassar estas dificuldades, todos os modelos de pilares ensaiados apresentaram a forma ilustrada na Fig. 1. As dimensões relativas dos modelos de pilares cilíndricos tiveram por

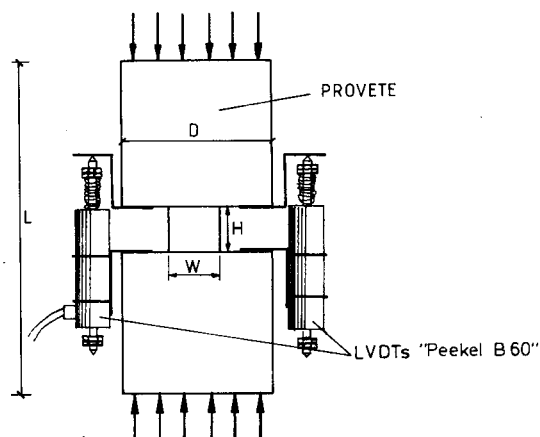


Fig. 1 — Esquema do modelo de pilar

objectivo reduzir as possibilidades de rotura por flexão na zona vizinha acima do topo dos pilares. De acordo com o trabalho apresentado por Mendes (1972), essas dimensões devem ser tais que:

$$\frac{L}{D} = \frac{7}{3} \quad \text{e} \quad \frac{W}{D} = \frac{1}{3}$$

sendo W o diâmetro e H a altura do pilar, D o diâmetro das partes superior e inferior e L a altura total.

A rocha utilizada nos modelos de pilar foi uma rocha metamórfica xistosa de alta resistência, cuja xistosidade variava ligeiramente em torno dos eixos dos pilares.

Todos os modelos de pilares foram ensaiados em compressão uniaxial. Mediu-se apenas a deformação vertical de dois modos diferentes:

- i) pela posição do êmbolo da máquina de ensaio;
- ii) pela utilização de transdutores lineares (LVDT's) como mostra a Fig. 1.

Enquanto que no primeiro sistema era medida a deformação global dos provetes, no segundo era medida apenas a deformação do pilar. Os ensaios foram realizados com velocidade de deformação constante. Esta velocidade foi de $2\mu/\text{min}$ no início dos ensaios e após os primeiros sinais de cedência era mudada para $0,3\mu/\text{min}$. As extensões nos pilares foram também medidas, atingindo após início de cedência, aproximadamente $0,4 \times 10^{-6}/\text{s}$ (arroso, 1986).

Apesar de o número de ensaios realizados até agora ser reduzido foi possível obter informação acerca da tendência de variação da resistência dos pilares e do seu comportamento com a relação largura/altura. A Fig. 2 representa o gráfico da variação da resistência de pico com a relação largura/altura. É possível estabelecer uma relação linear dada por

$$\sigma = 138 \, W/H$$

em que σ é expresso em MPa. Esta relação implica uma variação mais rápida da resistência de pico com a relação W/H do que a apresentada por Wagner (1984) com modelos de pilares cilíndricos de arenito.

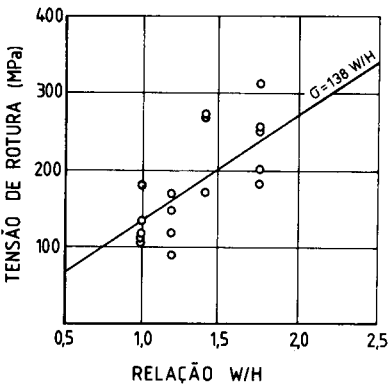


Fig. 2 — Evolução da resistência à compressão com a relação W/H

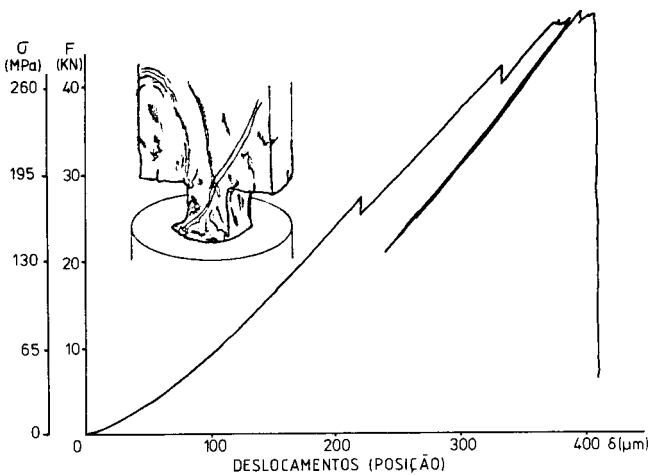


Fig. 3 — Comportamento tensões-deformações de um dos modelos de pilar e esboço do modo de rotura

A cedência ocorreu para níveis de carga muito elevados, correspondendo aproximadamente a 85% da carga máxima. Apesar de a relação W/H variar apenas entre 1 e 1,75 e de a velocidade de deformação axial ser imposta, verificou-se uma nítida tendência para a estabilização da carga num valor próximo do máximo por um certo período de tempo após o valor de pico. Trata-se pois de uma rocha que conduz a rotura controlada dos pilares, com grande resistência residual para relações W/H superiores a um.

Além disso, para os cinco modelos de pilar com $W/H=1,75$, dois deles romperam por punçoamento das cabeças (Fig. 3 e 4). Isto justifica a utilidade de alguns princípios da engenharia de fundações para valores da relação largura/altura que no caso presente não deverão ser muito altos.

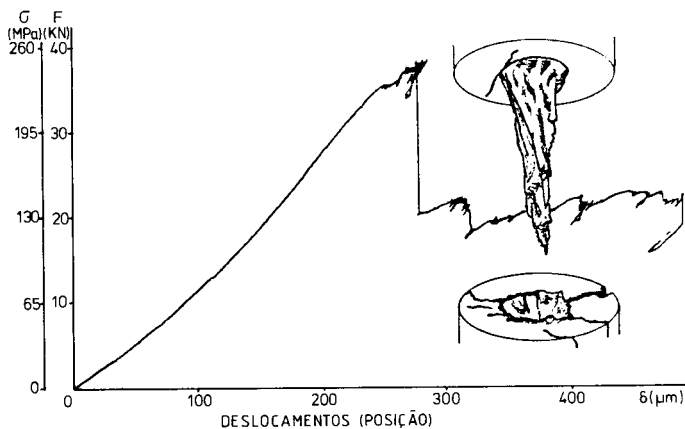


Fig. 4 — Comportamento tensões-deformações de um dos modelos de pilar e esboço do modo de rotura

No caso representado na Fig. 3 deu-se a rotura por punçoamento de uma das cabeças. Esta rotura foi precedida de roturas localizadas a cerca de 171 MPa (55% da carga máxima) e a cerca de 273 MPa (88% da carga máxima). De notar que no registo gráfico dos dois ciclos de carga e descarga parcial, efectuados pouco antes da rotura, a inclinação das curvas é semelhante à registada antes da cedência. No esquema representado na Fig. 3 são visíveis algumas linhas de corte provocadas pelo punçoamento.

No caso mostrado na Fig. 4 o punçoamento foi ainda mais claro, o que justifica o alto valor de resistência residual (150 MPa, 57% da carga máxima) e a sua permanência por tanto tempo.

O facto de ocorrerem estes punçoamentos revela a necessidade de simular o efeito de confinamento das cabeças dos provetes de ensaio, de modo a melhor representar o comportamento real dos pilares das minas.

3 — MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DOS PILARES

Foi realizada uma análise numérica para estudar a distribuição de tensões e deslocamentos nos provetes, considerando a rocha homogénea e isotrópica, com um comportamento elástico linear. Embora com um modelo deste tipo não seja possível estudar o comportamento dos provetes até à rotura, é possível, mediante os valores das tensões instaladas em diversos pontos do provete e um critério de rotura, identificar as zonas que primeiro atingem a rotura.

Para esta análise numérica utilizou-se um modelo tridimensional de elementos de fronteira (Lamas, 1984). Este modelo utiliza uma formulação directa do método dos elementos de fronteira e elementos quadrangulares parabólicos isoparamétricos com 8 pontos nodais. A malha de elementos de fronteira utilizada tinha 104 elementos com 378 nós, tendo sido calculadas as tensões e os deslocamentos em 70 pontos interiores.

Foram estudadas três situações diferentes, sendo em todas elas o diâmetro do pilar de $W=14$ cm e respeitando-se as relações dimensionais apresentadas acima. O módulo de elasticidade foi considerado de valor unitário. A altura do pilar, H , e o coeficiente de Poisson, ν , tomaram os seguintes valores:

Situação	H (mm)	ν
I	14	0,2
II	14	0,4
III	8	0,2

A situação I corresponde à geometria mais frequente dos provetes ensaiados, e o coeficiente de Poisson tem um valor usual para este tipo de rochas. Na situação II fez-se aumentar o coeficiente de Poisson para um valor que se pode considerar como um limite superior dos valores que ν toma neste tipo de rochas. Esta situação poderá fornecer uma melhor distribuição das tensões para elevadas cargas axiais, na medida em que é usual o valor de ν aumentar com o valor da carga axial. Na situação III usou-se outro valor de H , com o mesmo ν de I, por forma a investigar a influência da relação largura/altura do pilar na distribuição de tensões.

Para cada situação consideram-se três casos de carregamento. Todas as cargas aplicadas foram de valor unitário e uniformemente distribuídas da seguinte forma: a) carga vertical

actuando nos topos dos provetes; b) carga horizontal actuando perpendicularmente às faces verticais do provete, com excepção das paredes do pilar; c) carga horizontal actuando nas paredes dos pilares. O caso a) corresponde às condições de ensaio e simula uma tensão vertical unitária no maciço rochoso. O caso b) simula um estado de tensão unitário, hidrostático no plano horizontal, no maciço rochoso. Com o caso c) pretendeu-se estudar a influência de um material de enchimento na estabilidade do pilar.

A análise dos resultados obtidos para o caso de carregamento c) mostra que, numa análise elástica, a influência de uma pequena pressão de confinamento nas paredes do pilar sobre a distribuição de tensões é desprezável. Este resultado era de esperar porque a pressão de confinamento é muito pequena quando comparada com as tensões que se instalam no pilar devido ao estado de tensão inicial do maciço. Só quando se atinge o início da rotura é que o enchimento começa a ter o seu papel que consiste em limitar as grandes deformações de blocos do pilar e consequentemente aumentar consideravelmente a sua resistência.

A Fig. 5 mostra uma imagem de deslocamentos num plano diametral obtido para a situação I, ou seja, para as condições de ensaio. Vê-se claramente a flexão da superfície horizontal na zona do topo do pilar e o aumento do valor dos deslocamentos, na zona superior ao pilar, do centro para a periferia. Isto evidencia a vantagem deste tipo de provetes para estes estudos, uma vez que permitem uma melhor simulação das condições existentes na realidade.

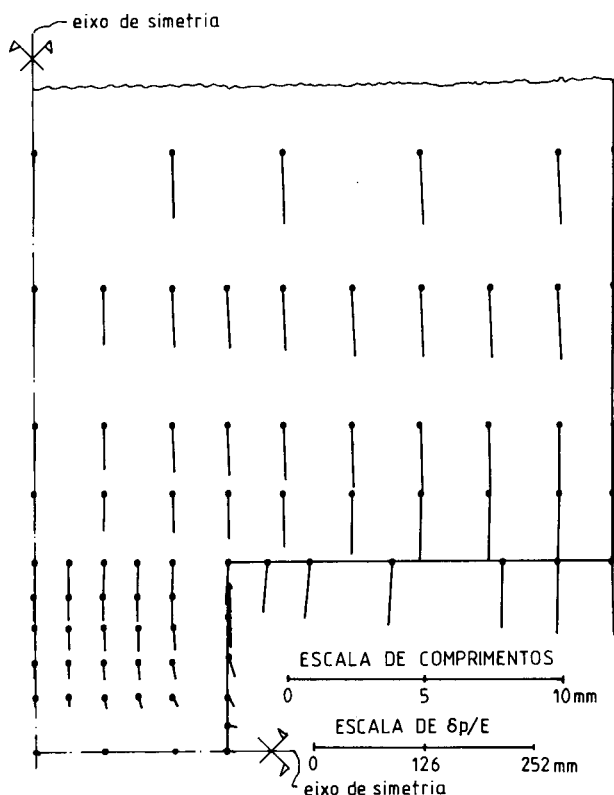


Fig. 5 — Deslocamentos obtidos pelo modelo numérico

Para a situação I investigou-se também a influência de uma tensão horizontal para a estabilidade do pilar. Assim, adicionaram-se 1/3, 1 e 3 vezes os valores das tensões obtidas para o caso b) aos valores das tensões calculadas para o caso a). A Fig. 6 representa as tensões principais nos pontos interiores mais significativos num gráfico com σ_I/σ_c nas ordenadas e σ_{III}/σ_c nas abscissas, em que σ_c é a resistência à compressão simples da rocha, para um valor da carga vertical próximo da carga de rotura dos provetes. A localização dos pontos interiores

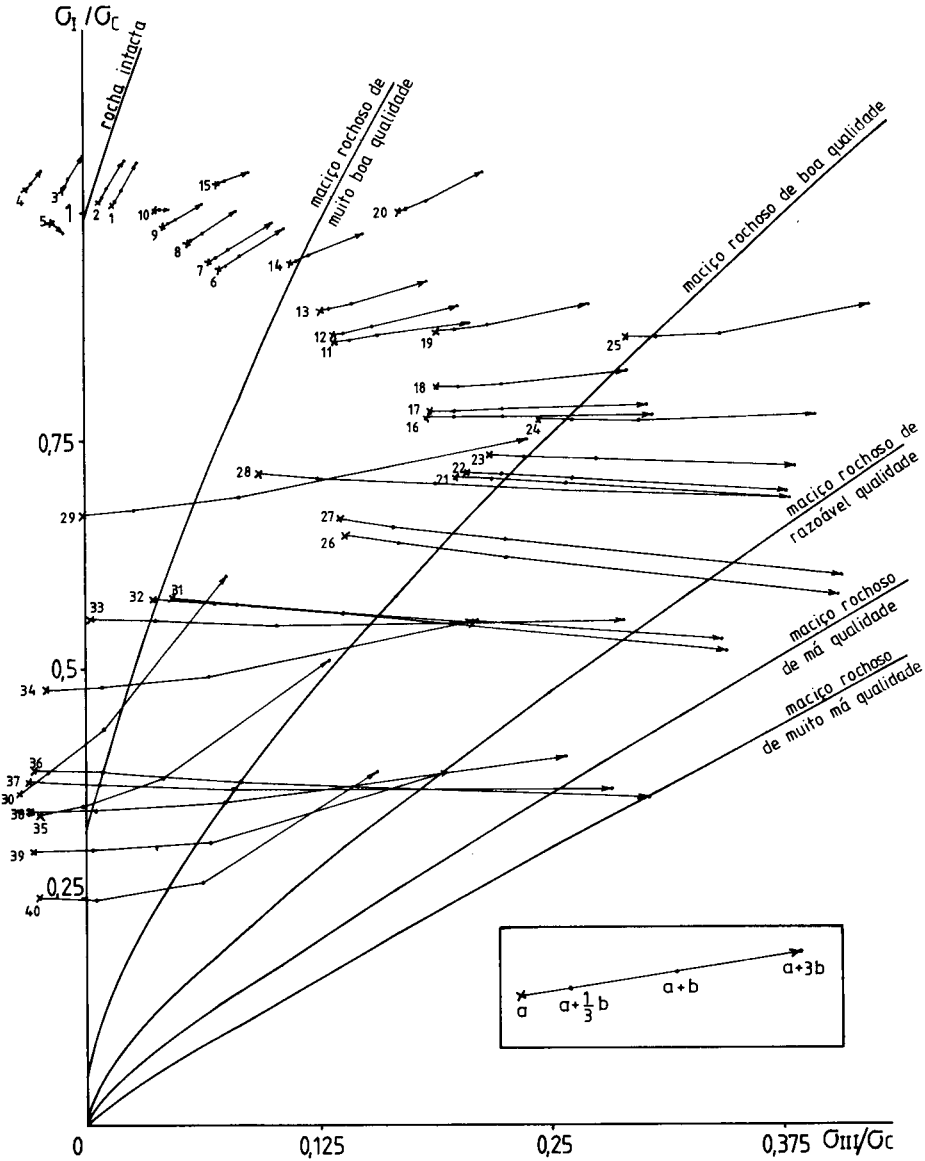


Fig. 6 — Influência de uma carga distribuída horizontal sobre as tensões no modelo de pilar

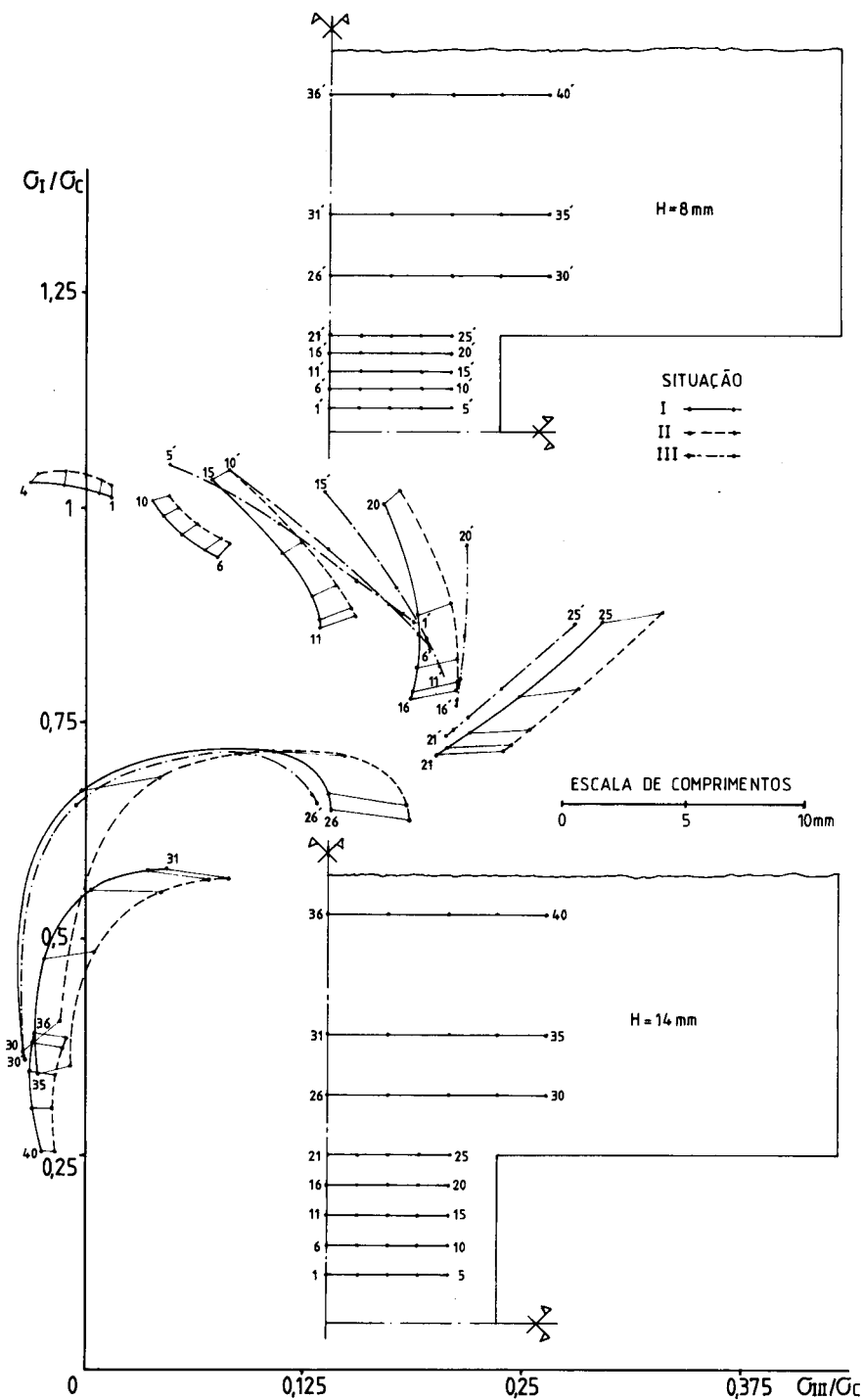


Fig. 7 — Influência do coeficiente de Poisson e de W/H sobre as tensões no modelo do pilar

está indicada na Fig. 7. Desenharam-se as envolventes relativas ao critério de rotura de Hoek e Brown para várias qualidades de maciços rochosos (Brady e Brown, 1985), para o tipo de rocha dos provetes (rocha xistosa). Para todos os pontos, a adição de uma tensão horizontal conduziu a um melhoramento das condições de estabilidade. Grande parte das tracções desapareceu e a trajectória das tensões com a aplicação das tensões horizontais tem o sentido das envolventes de rotura relativas a piores qualidades de maciços rochosos. Este efeito estabilizante já era esperado e confirma os resultados obtidos por outras vias.

A Fig. 7 representa as tensões nos pontos internos num gráfico de σ_I/σ_c contra σ_{III}/σ_c para as três situações analisadas, e só para o caso de carregamento *a*). Os pontos do gráfico que correspondem a pontos do provete na mesma linha horizontal foram unidos por linhas, de forma a proporcionar uma melhor visualização da evolução das tensões no interior dos provetes. Esta figura mostra que, da situação I para a II, a variação dos valores das tensões na zona do pilar não é muito importante, mas que aumenta para as zonas mais distantes do pilar. Com excepção dos pontos 1 a 4, um aumento do coeficiente de Poisson conduziu a uma situação mais favorável, movendo-se os pontos do gráfico no sentido das envolventes de rotura correspondentes a maciços rochosos de pior qualidade. No entanto, para os pontos 1 a 4, σ_{III} é próximo de zero e σ_I tem um pequeno aumento, o que significa que nesta zona central do pilar, onde há uma maior probabilidade de a rotura se iniciar, um aumento do coeficiente de Poisson pode conduzir a uma situação desfavorável.

Comparando as curvas para a situação I e II, verifica-se facilmente uma importante melhoria da estabilidade do pilar quando a sua altura diminui e, consequentemente, a relação largura/altura aumenta.

4 — INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO LARGURA/ALTURA NO COMPORTAMENTO DOS PILARES

Para a avaliação do comportamento global de uma mina explorada usando pilares de suporte, é muito importante estudar a resistência dos pilares bem como a sua capacidade de deformação. Com efeito, os aspectos deformacionais do comportamento dos pilares são aqueles que mais influenciam a redistribuição de tensões associada a qualquer método de exploração. Se a flexibilidade de um pilar for definida pela relação entre a deformação máxima e a carga correspondente, a flexibilidade dos pilares aumenta de uma forma muito nítida com a relação largura/altura. Isto é uma consequência da mudança do comportamento carga-deformação dos pilares modelizados, de frágil para dúctil, com o aumento da relação largura/altura.

Além disto, é de referir que a carga máxima que cada pilar irá suportar depende principalmente da pressão de recobrimento e do espaçamento entre pilares.

Para se obterem as condições mais adequadas de deformação dos pilares, o seu dimensionamento deve ser precedido pela estimação das curvas representativas da variação não-linear das resistências de pico e das deformações máximas com a relação largura/altura. Então, conhecendo a carga a ser suportada por cada pilar, o valor mais adequado da relação largura/altura pode ser calculado. Isto significa que, conhecendo a carga que o pilar terá de suportar, a relação largura/altura irá controlar o comportamento global do pilar, o qual pode variar de elasto-frágil a elasto-plástico. Contudo, uma dificuldade importante reside na quantificação dos parâmetros que definem este tipo de comportamento.

A avaliação das condições de carregamento tem que ter em conta as modificações provocadas pelo progresso de escavação da mina. Isto pode ser feito usando modelos matemáticos que fazem uso dos parâmetros que condicionam o comportamento global da mina. Os modelos devem ser calibrados usando a informação obtida pela observação do comportamento da mina durante a fase de exploração. Devido às dificuldades associadas à medição de tensões em maciços rochosos, é usual observar o comportamento deformacional, principalmente através de medição de convergências entre pilares. Se for possível associar as convergências com a deformabilidade dos pilares, o dimensionamento dos pilares de suporte será feito de uma forma mais segura. É por esta razão que o estudo do comportamento dos pilares até à rotura constitui um domínio de investigação do maior interesse, de forma a poderem estabelecer-se de uma forma quantitativa os dados de partida para os métodos de cálculo.

Devido à sua constituição, os materiais de enchimento utilizados em minas têm grande deformabilidade e pequena resistência, quando comparados com as propriedades dos maciços rochosos das explorações mineiras. Assim sendo, numa análise elástica, a contribuição do material de enchimento para a estabilidade global da mina é desprezável. Com efeito, a acção do material de enchimento na estabilidade dos pilares só começa a ser importante quando as primeiras roturas locais ocorrem, evitando que se destaquem dos pilares os blocos de rocha que se venham a formar. Desta forma, mesmo que as roturas locais sejam do tipo elasto-frágil, o efeito do material de enchimento é fazer com que o comportamento das zonas onde estas roturas locais ocorrem seja elasto-plástico. Além disso, como com o desenvolvimento da rotura as pressões de confinamento aumentam, e consequentemente a resistência dos pilares, pode-se concluir que o efeito provocado pelo uso de materiais de enchimento é muito semelhante a aumentar a relação largura/altura. Se o material de enchimento encher completamente as cavidades, tem também um importante efeito de melhoramento da estabilidade do tecto, retardando o início da rotura e reduzindo a sua magnitude. Este é um domínio do conhecimento que merece estudos mais profundos quer por via experimental quer teórica.

5 — CONCLUSÕES

O estudo levado a cabo com modelos de pilares de uma rocha metamórfica xistosa mostrou que a resistência à compressão aumenta rapidamente com a relação largura/altura. Simultaneamente, o comportamento carga-deformações muda de frágil para plástico com um aumento relativamente pequeno da relação largura/altura. A análise numérica efectuada mostrou que o material de enchimento não tem qualquer influência sobre a estabilidade dos pilares durante a fase elástica, e que um aumento da relação largura/altura conduz ao melhoramento da estabilidade dos pilares. As pressões de confinamento aplicadas nas partes superior e inferior dos provetes também mostraram ter um efeito favorável.

Conforme as análises experimental e numérica mostraram, é importante estudar a influência do confinamento dos estratos do tecto e do chão das cavidades. É também importante estudar a influência de um enchimento, com ou sem cimento, sobre as características de resistência e de carga-deformações dos pilares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROSO, M.; MENDES, F. M. (1982) — *Estudo do comportamento dos pilares da mina da Panasqueira*. LNEC, Relatório interno, Lisboa.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. (1985) — *Rock Mechanics for Underground Mining*. London, George Allen and Unwin.
- LAMAS, L. (1984) — *Modelo tridimensional de elementos de fronteira para análise de estruturas subterrâneas*. LNEC, Relatório interno, Lisboa.
- MENDES, F. M.; GAMA, C. D. (1972) — *Laboratory simulation of mine pillars mechanical behaviour*. 14th American Symp. on Rock Mechanics, Pennsylvania State University.
- WAGNER, H. (1964) — *Fifteen years experience with the design of coal pillars in shallow South African Collierie: an evaluation of the performance of the design procedures and recent improvements*. ISRM Symp., Cambridge, U. K.