

ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE GRANDES ABERTURAS SUBTERRÂNEAS EM CENTRAIS HIDROELÉCTRICAS*

Three dimensional analysis of large openings in power stations

por

L. R. Sousa**

RESUMO — A análise da estabilidade de grandes obras subterrâneas pode ser feita com base em modelos numéricos tridimensionais, nomeadamente os baseados no método dos elementos finitos e dos elementos de fronteira. São feitos estudos para uma central hidroeléctrica subterrânea utilizando modelos de elementos finitos, sendo os resultados comparados com os obtidos num modelo experimental e com deslocamentos observados.

SYNOPSIS -- Stability analysis of large openings may be carried out using 3-D numerical models namely those based on finite elements and boundary element methods. Studies are made for an underground powerhouse by using finite element models, and the results are compared with those obtained on an experimental model and with the monitored displacements.

1 — INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de centrais eléctricas subterrâneas, a construção de grandes aberturas subterrâneas (cavernas) desempenha um papel importante no projecto de tais empreendimentos. Neste artigo, tendo presente os problemas relacionados com a estabilidade e a segurança das estruturas, analisam-se os modelos conceptuais, baseados quer na aproximação de meio contínuo, quer de meio descontínuo, utilizados na análise destas estruturas subterrâneas. Os correspondentes modelos de cálculo são, geralmente, modelos numéricos, sendo dado neste trabalho, pela sua importância, ênfase especial aos modelos numéricos baseados nos métodos de elementos finitos e de elementos de fronteira.

Nas cavernas, os equilíbrios que se desenvolvem são, em regra, de natureza tridimensional. Por isso, foi desenvolvido, no LNEC, um modelo tridimensio-

* Trabalho elaborado com base numa comunicação apresentada ao V Congresso do ISRM, Melbourne, 1983.

** Engenheiro Civil, Investigador Principal do LNEC.

nal de elementos finitos. O modelo considera a influência das sequências de escavação, a introdução de suportes e admite, para a aproximação de meio contínuo, a hipótese de um corpo elástico e anisotrópico, enquanto que, para a aproximação de meio descontínuo, admite a hipótese de não resistência à tracção e de comportamentos não-lineares a deformações tangenciais.

Com este modelo tridimensional, foram feitos estudos relativos a uma central hidroeléctrica subterrânea localizada em Moçambique, cujas dimensões características da caverna da central são as seguintes: 216,7 m de comprimento, 28,9 m de largura e 57,0 m de altura máxima. Construiu-se um modelo de cálculo, considerando um bloco que contém parte da central e de uma chaminé de equilíbrio. Foram feitos cálculos relativos a diferentes sequências de escavação e os resultados são comparados com os obtidos num modelo experimental tridimensional desenvolvido no LNEC e num modelo de elementos finitos não linear plano. Apresentam-se, também, valores de deslocamentos observados, que se comparam com valores calculados.

2 — CONCEPÇÃO E CÁLCULO DE GRANDES OBRAS SUBTERRÂNEAS

2.1 — Considerações gerais

A concepção e cálculo de grandes estruturas subterrâneas envolve o conhecimento das condições geológicas e geotécnicas do maciço rochoso, onde se pretende instalar as obras, que deverá incluir os diferentes tipos de rocha e as suas propriedades mecânicas, a geometria e a natureza da fracturação, os acidentes geológicos, o estado de tensão inicial e as propriedades hidráulicas e térmicas do maciço rochoso.

Para o projecto destas obras, um dos processos utilizados consiste fundamentalmente no seguimento das seguintes etapas (Olsen e Broch, 1977): *i)* selecção do local que sob o ponto de vista de estabilidade mostre condições óptimas tendo em consideração as características geométricas do meio; *ii)* definição dos eixos de orientação das aberturas que minimizem os problemas resultantes da análise de estabilidade das obras; *iii)* definição das formas das cavernas e de outras obras subterrâneas tendo em consideração as propriedades mecânicas e a fracturação do maciço rochoso, bem como o estado de tensão inicial; *iv)* dimensionamento das diferentes partes do complexo de obras subterrâneas e posterior fase de cálculo para verificação das

condições de estabilidade e segurança das estruturas. O processo referido pode, em geral, ser utilizado iterativamente até se atingir uma solução considerada mais adequada do ponto de vista económico.

O dimensionamento de grandes estruturas subterrâneas, como sejam as centrais eléctricas subterrâneas, fundamenta-se, essencialmente, em métodos empíricos, baseados na prática de obras precedentes e em resultados da observação de outras obras, em estudos de estabilidade utilizando resultados de análise de tensões e deformações, assumindo aproximações de meio contínuo ou de meio descontínuo, e em análises usando técnicas de equilíbrio limite aplicadas a determinados mecanismos de rotura (Richards *et al.*, 1977). A definição de formas para os suportes é normalmente função das dimensões dos blocos da compartimentação do maciço, do vão da obra e do espaçamento das ancoragens (Cording *et al.*, 1971).

Por seu lado, a apreciação dos vários métodos de cálculo utilizados na análise destas obras levanta a questão de qual a idealização ou idealizações adequadas às várias situações, traduzidas nos denominados modelos conceptuais, e em particular de qual o significado e verosimilhança das aproximações de meio contínuo e de meio descontínuo (Rocha, 1976 e 1981). Deve-se salientar que, dado o conhecimento insuficiente que se tem das propriedades dos maciços rochosos, não se justificam, em geral, idealizações complexas.

A aproximação de meio contínuo justifica-se quer no caso de maciço são e sem descontinuidades relevantes no espaço interessado pela obra a projectar, quer no caso de maciço fracturado em que a ordem de grandeza do espaçamento das descontinuidades é pequena comparada com as dimensões da obra. A aproximação de meio descontínuo deverá aplicar-se aos maciços rochosos cortados por descontinuidades, cujo espaçamento não é desprezável face às dimensões da obra e nesse caso procura-se a simulação individualizada de descontinuidades ou de grupos de descontinuidades relevantes. No entanto, a aproximação descontínua, no estágio actual de conhecimentos, só tem sido aplicada no caso das fracturas serem consideradas contínuas (Cunha e Sousa, 1983).

2.2 — Modelos numéricos

A utilização de modelos de cálculo tem vindo a proporcionar uma contribuição importante no projecto de grandes estruturas subterrâneas, bem como na investigação da fenomenologia associada às obras subterrâneas. Os modelos de

cálculo têm consistido fundamentalmente em modelos físicos, por meio dos quais o protótipo pode ser duplicado a uma escala conveniente e com o mínimo de distorsão, e em modelos numéricos, que têm tido um progresso espectacular. Os principais modelos numéricos são essencialmente baseados em princípios da mecânica dos meios contínuos e os mais importantes são formulados com base no método dos elementos finitos e dos elementos de fronteira. Os métodos de equilíbrio limite são também de realçar, pois permitem analisar a estabilidade das aberturas subterrâneas e dos blocos definidos pela estrutura geotécnica do maciço, tendo em conta as características de resistência ao escorregamento ao longo das superfícies de descontinuidade.

Os modelos baseados no método dos elementos finitos têm vindo a conhecer uma larga aplicação no domínio das estruturas subterrâneas. O interesse de tal aplicação radica na versatilidade e na facilidade com que permitem considerar, nomeadamente, diferentes tipos de reologias para o maciço rochoso, suposto como meio contínuo ou meio descontínuo, diferentes sequências de construção e de estados de tensão inicial. Os modelos de elementos finitos utilizados na análise estrutural estão intimamente ligados ao tipo de idealização adoptada (contínua ou descontínua). No caso de modelos descontínuos, têm sido formulados elementos finitos especiais, designados elementos de junta, que permitem a simulação das descontinuidades existentes no maciço rochoso e de eventuais superfícies de interface entre o maciço e os suportes (Goodman, 1976), (Cunha, 1981).

Os modelos de elementos finitos são também importantes para a quantificação das acções em obras subterrâneas. No caso da percolação da água através do sistema de fracturação do maciço rochoso, desenvolvem-se modelos tendo em vista a quantificação das suas acções. A quantificação dessas acções e dos caudais resultantes da percolação da água efectua-se através do estudo do escoamento, que envolve a determinação, em geral, da repartição do potencial hidráulico, tendo em conta as condições de fronteira do problema e as características hidráulicas do maciço rochoso (Mascarenhas, 1979). De referir também modelos para análise de solicitações provenientes de variações de temperatura, mais relevantes no caso de cavernas para armazenagem de produtos e em cavernas alojando centrais nucleares.

Nas cavernas, os equilíbrios que se desenvolvem são em geral de natureza tridimensional. Por vezes, os modelos de elementos finitos tridimensionais são ineficientes por envolverem um considerável número de dados e tempos

computacionais impraticáveis. Daí que os modelos por elementos de fronteira possam ser adequados na análise de estruturas subterrâneas e em particular em problemas tridimensionais, por suplantarem em parte algumas das dificuldades apontadas para os modelos de elementos finitos. O método dos elementos de fronteira constitui um método integral, que utiliza funções de aproximação que satisfazem as equações governativas do problema no seu domínio, mas são aproximadas nas fronteiras, utilizando para tal as técnicas habituais dos elementos finitos (Brebbia, 1978). Infelizmente, os modelos de elementos de fronteira não são suficientemente adequados para a simulação de anisotropias e de comportamentos não-lineares complexos, como são os que resultam das diferentes sequências construtivas. Permitem, no entanto, a resolução de problemas envolvendo domínios infinitos, pelo que, no caso das estruturas subterrâneas, se torna apenas necessário a discretização das superfícies de escavação.

3 — MODELO DE CÁLCULO TRIDIMENSIONAL DESENVOLVIDO

3.1 --- Características gerais do modelo

Foi desenvolvido no LNEC um modelo de cálculo utilizando o método dos elementos finitos, que permite considerar a natureza tridimensional dos equilíbrios que se desenvolvem na vizinhança das grandes obras subterrâneas (Ocampo, 1982). O modelo considera o maciço rochoso como um meio contínuo ou como um meio contínuo intersectado por descontinuidades, admitindo comportamentos não-lineares ao longo dessas superfícies. Por outro lado, procura-se simular no modelo, por técnicas adequadas, a sequência de escavação das obras e a introdução de suportes.

3.2 — Sequências de construção e análise não-linear

Com a finalidade de simular a escavação real e a eventual introdução de suportes, o modelo de cálculo permite a consideração de várias fases, cada uma das quais corresponde a uma determinada etapa de construção, por retirada de elementos que coincidem com o volume escavado e pela eventual introdução de elementos de suporte.

Tal forma de proceder corresponde a uma não linearidade geométrica, posto que, ao desactivarem-se em cada fase os elementos correspondentes às zonas escavadas nessa fase, aparece uma nova estrutura na qual não existe equilíbrio entre as forças correspondentes aplicadas na fase anterior e as devidas às tensões instaladas. Em cada fase, a existência destas forças não equilibradas mais os eventuais acréscimos de solicitação associados à fase implica um acréscimo de deslocamentos, calculado com base numa equação matricial referida num trabalho de Cunha (1981).

Para além destas não linearidades geométricas, definem-se não linearidades físicas para as superfícies de descontinuidades. Seguem-se técnicas iterativas que correspondem, numa dada fase, a um carregamento da estrutura no início do processo e utiliza-se o método das tensões iniciais que permite manter a matriz de rigidez em cada etapa de cálculo (Sousa, 1974).

3.3 — Aproximação de meio contínuo

Para a simulação da aproximação de meio contínuo, admite-se, para o maciço rochoso, um comportamento elástico linear, considerando um corpo transverso-isotrópico definido por cinco constantes elásticas independentes: módulos de elasticidade E_1 e E_2 para cargas perpendiculares e paralelas aos planos de isotropia, coeficientes de Poisson ν_1 e ν_2 e módulo de distorção G_1 .

O domínio é discretizado por vários tipos de elementos finitos, nomeadamente elementos isoparamétricos prismáticos de 8 e 6 pontos nodais, tetraedros de 4 pontos nodais e elementos de 5 pontos nodais compostos por dois tetraedros. A simulação dos suportes de betão pode ser feita com base em elementos subparamétricos de 8 pontos nodais desenvolvidos por Pedro e Pina (1982).

3.4 — Simulação das descontinuidades

Admitindo a aproximação de meio descontínuo, as superfícies de descontinuidade são supostas contínuas e com comportamento elástico ou não-linear sendo simuladas por elementos finitos de junta. Na hipótese de comportamento linear, as juntas são consideradas não dilatantes e a sua deformabilidade caracterizada por dois valores de rigidez tangencial e um de rigidez normal.

Na hipótese de comportamento não-linear, admite-se, no modelo de cálculo, o critério de não resistência à tracção na direcção normal ao plano das descontinuidades; e, na direcção das descontinuidades, segue-se o critério de Coulomb. No modelo dois tipos de elementos de junta superficial são considerados: do tipo triangular de 6 pontos nodais e do tipo quadrangular de 8 pontos nodais (Fig. 1).



Fig. 1 -- Elementos de junta superficiais

4 -- ANÁLISE DE UMA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SUBTERRÂNEA

4.1 -- Características gerais da obra

Tendo em vista avaliar as capacidades do modelo tridimensional desenvolvido e ilustrar as ideias expostas neste trabalho e na sequência de um trabalho iniciado por Ocampo (1982), foram feitos estudos de aplicação a uma grande central subterrânea hidroeléctrica do empreendimento de Cahora Bassa, localizada em Moçambique (Figueiredo e Bastos, 1975). Na Fig. 2, pode ver-se uma perspectiva esquemática da central e anexos. As obras subterrâneas situam-se a

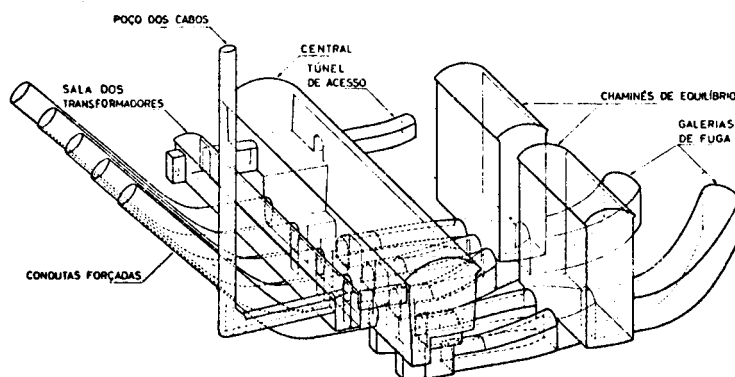


Fig. 2 -- Perspectiva esquemática das aberturas subterrâneas

uma profundidade que, no caso da central, varia de cerca de 130 m numa extremidade a 230 m na outra, correspondendo as dimensões características desta caverna a um comprimento de 216,7 m, uma largura de 28,9 m e alturas mínima e máxima de 24 e 57 m. As duas chaminés de equilíbrio, implantadas paralelamente à central, apresentam as seguintes dimensões características: comprimento de 82,5 e 87,7 m para as chaminés Norte e Sul; largura de 19,0 m; e alturas de 72,0 e 70,3 m para as chaminés Norte e Sul, respectivamente.

O maciço rochoso do local é constituído por gnaíse granitoide a que se associam diversas formações filonianas. A existência de filões lamprofíricos veio a revelar-se importante no comportamento global das obras, como se comprovou num acidente verificado numa das chaminés de equilíbrio (Rocha, 1976). Foram detectadas três famílias principais de diaclases e acidentes geológicos do tipo falha são escassos.

O LNEC (1969, 1970) contribuiu decisivamente para o estudo geotécnico do maciço rochoso que, numa fase inicial, consistiu em : i) estudo da deformabilidade e fluência do maciço rochoso e das rochas constituintes; ii) estudo das características de corte e de deslizamento das diaclases e da anisotropia da rocha; iii) estudo das tensões internas no local da central; iv) estudo do avanço das galerias e dos furos de sondagem.

Alguns resultados mais significativos, referentes à caracterização mecânica e à determinação das tensões internas, são sintetizados no Quadro 1.

QUADRO 1 — Síntese de parâmetros determinados *in situ*

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Módulo de elasticidade do maciço rochoso</i>	
<i>médio</i>	65 GPa
<i>máximo</i>	116 GPa
<i>mínimo</i>	23 GPa
<i>Resistência ao corte</i>	
<i>diaclases em gnaíse</i>	$C \div 0,3 \text{ MPa}; \phi = 33^\circ \text{ a } 41^\circ$
<i>lamprófiro</i>	$C = 0,2 \text{ MPa}; \phi = 20^\circ$
<i>Tensões iniciais</i>	
Tensão principal máxima	13 a 18 MPa
Tensão principal mínima	9 a 12 MPa

4.2 — Modelos de elementos finitos utilizados

Tendo em vista a análise dos deslocamentos e do estado de tensão em redor das cavernas do complexo subterrâneo, idealizou-se um modelo de cálculo tridimensional por elementos finitos considerando um bloco que abarcou o topo sul da central, metade da chaminé sul e respectivo difusor de ligação (Fig. 3). Dada a profundidade a que se situa a central, admitiu-se a hipótese de que a superfície do terreno tinha um efeito desprezável nas fronteiras da escavação. Por essa razão e introduzindo algumas simplificações, admitiram-se as fronteiras fixas em relação a movimentos normais. A malha de elementos finitos contém 1034 elementos sólidos, com um total de 756 pontos nodais.

Seguindo a aproximação de meio contínuo, o maciço rochoso foi suposto como meio homogêneo, elástico e isótropo, caracterizado por um módulo de elasticidade igual a 70 GPa e por um coeficiente de Poisson de 0,2. O estado de

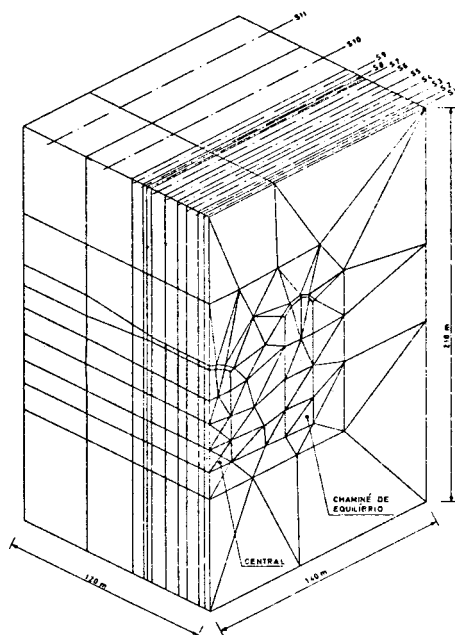


Fig. 3 — Malha de elementos finitos tridimensional

tensão inicial foi suposto uniforme, caracterizado por uma tensão vertical de $\sigma_v = 15$ MPa, uma tensão horizontal de $\sigma_h = 10$ MPa e uma tensão tangencial $\tau_{hv} = 0$. Para os suportes de betão das cavernas, adoptou-se um módulo de elasticidade de 40 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2, tendo como base ensaios efectuados.

Adoptaram-se duas situações de cálculo: i) escavação numa só fase desactivando os elementos finitos correspondentes às aberturas e aos suportes de betão (Fig. 3); ii) sequência de construção em quatro fases de acordo com o assinalado na Fig. 4 para a secção S_1 .

Finalmente, construiu-se um modelo de elementos finitos bidimensional contendo a secção S_1 , tendo em vista a comparação de resultados com o modelo tridimensional e a análise da influência das restantes cavidades, como seja a sala de transformadores, condutas forçadas e galeria de fuga (Fig. 5). O modelo utiliza um programa de cálculo automático, que permite a consideração da sequência de construção e não linearidade físicas, quer para os elementos finitos que simulam o contínuo, quer para os elementos de junta

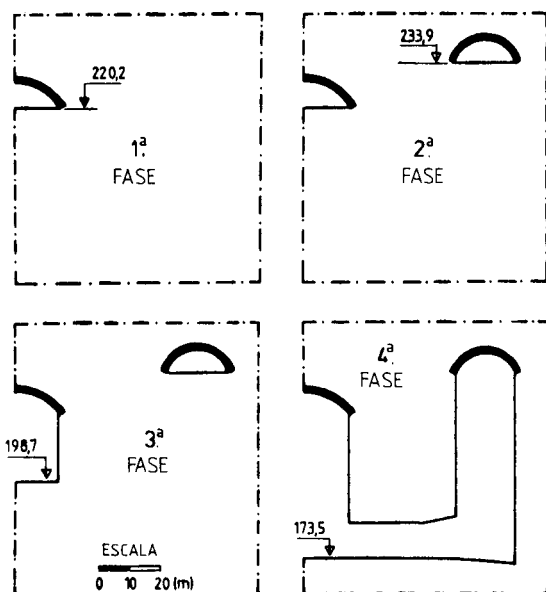


Fig. 4 — Sequência de construção simulada pelo modelo tridimensional para a secção S_1

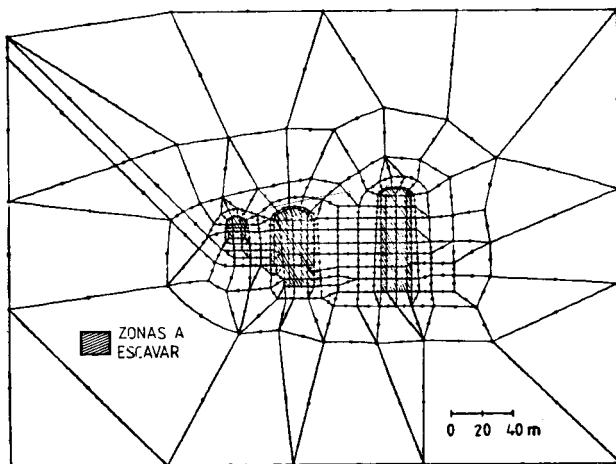


Fig. 5 — Malha de elementos finitos bidimensional

curvos, e contém elementos lagrangeanos especialmente formulados para a simulação dos suportes de betão (Sousa e Teles, 1980). Por simplicidade de análise, considerou-se apenas uma sequência de escavação, tendo sido adoptadas, nas zonas correspondentes às condutas forçadas, difusor e galeria de fuga, características de deformabilidade adequadas, que em termos médios permitissem considerar o efeito das aberturas.

4.3 — Modelo experimental

O LNEC (Silveira *et al.*, 1974) conduziu uma série de ensaios num modelo experimental tridimensional tendo em vista conhecer o estado de tensão nas superfícies de fronteira da central e das chaminés de equilíbrio. O modelo usado tinha a forma de um cubo de 1,75 m de aresta, no interior do qual foram reproduzidas as aberturas subterrâneas (Fig. 6).

O modelo foi obtido colando vários blocos feitos de um material formado por uma mistura de gesso, diatomite e água. Os testes levados a cabo consistiram em aplicar isoladamente uma compressão em cada uma de três direcções principais e em medir as deformações obtidas. A distribuição de tensões no protótipo, para qualquer relação entre a tensão vertical e as tensões laterais, foi determinada utilizando o método da sobreposição dos efeitos e as leis de semelhança elástica.

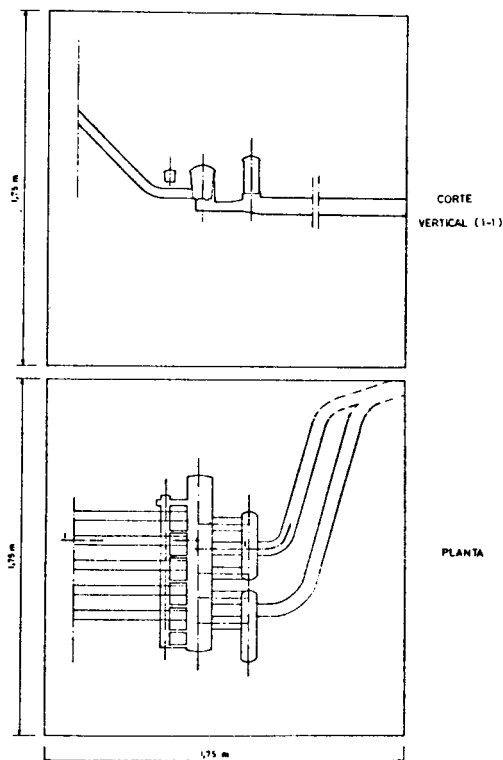


Fig. 6 -- Desenho esquemático do modelo experimental

O estado de tensão inicial adoptado coincide com o considerado nos modelos numéricos.

4.4 — Comparação entre resultados experimentais e numéricos

Os resultados experimentais mostram que, na caverna principal, o campo de tensões é, em geral, de compressão, sendo as tensões de tracção detectadas de pequena importância, ocorrendo as mais altas concentrações de tensões na central e na nascença da abóbada, próximo da parede de montante (Silveira *et al.*, 1974). A maior compressão foi de 55 MPa e, em relação a tracções, o valor mais alto detectado foi de 3 MPa.

Estes resultados foram comparados com os obtidos na primeira hipótese de cálculo adoptada no modelo tridimensional. Na Fig. 7, apresentam-se as tensões principais na caverna da central, enquanto que, na Fig. 8, se mostra as tensões principais nas superfícies da caverna da chaminé de equilíbrio sul.

Existe uma razoável concordância entre os dois tipos de valores, experimental e numérico, tendo em consideração o facto de que a malha de elementos finitos não foi suficientemente apertada, por dificuldades computacionais. Contudo existe uma melhor concordância nas paredes das cavernas.

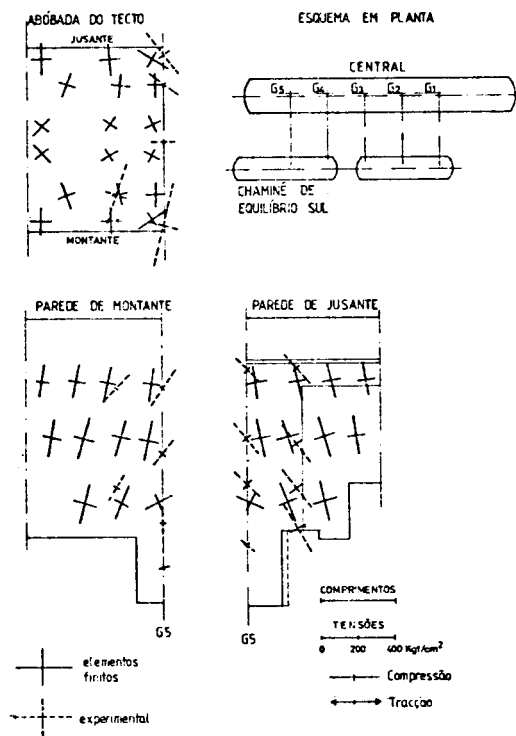


Fig. 7 — Tensões principais na caverna da central

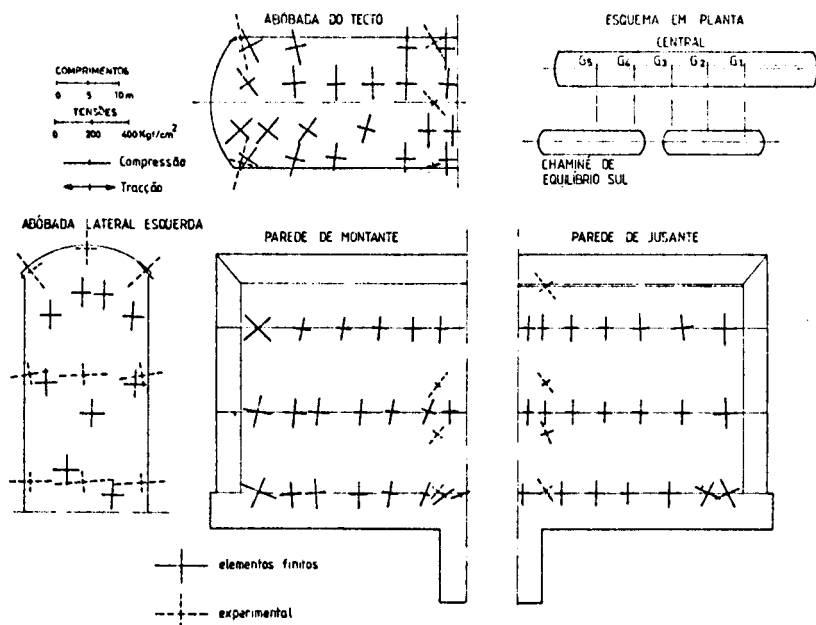


Fig. 8 - Tensões principais na caverna da chaminé de equilíbrio sul

4.5 -- Comparação entre deslocamentos calculados e observados

Na Fig. 9, apresentam-se resultados da análise tridimensional, deslocamentos calculados na secção S_1 , considerando uma sequência de construção em quatro fases. Nota-se uma grande influência nos resultados da sequência de escavação. Na Fig. 10, mostram-se deslocamentos obtidos, na mesma secção, utilizando o modelo bidimensional de elementos finitos. Neste caso, pode ver-se que os vectores de deslocamentos se dirigem preferencialmente para a chaminé de equilíbrio, o que ilustra a grande influência desta grande caverna sobre os resultados. Na Fig. 11, indicam-se as tensões principais calculadas.

Com o objectivo de complementar estes resultados e tendo presente as limitações dos modelos elásticos utilizados, foi adoptado no modelo plano um comportamento não-linear definido pelo critério de Coulomb, considerando uma coesão de 0,3 MPa e um ângulo de atrito de 41° (Quadro 1). Como a Fig. 12 mostra, as zonas de plastificação em torno das cavidades são importantes, sendo, no entanto, necessário referir que a presença de ancoragens conduzirá a uma considerável redução na extensão das zonas de plastificação.

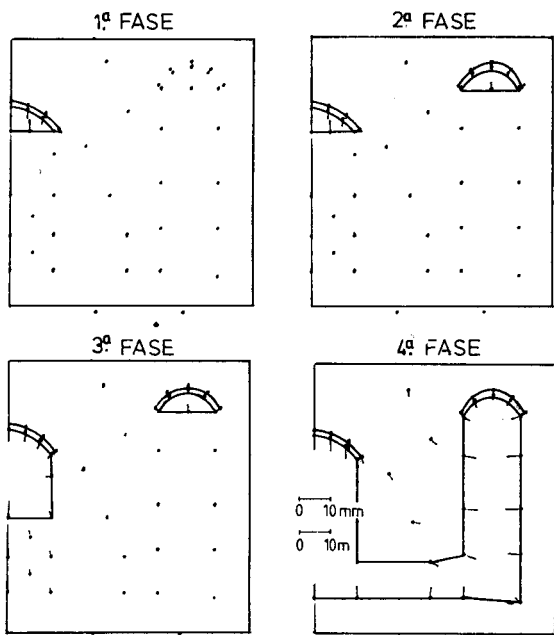


Fig. 9 -- Deslocamentos calculados pelo modelo tridimensional

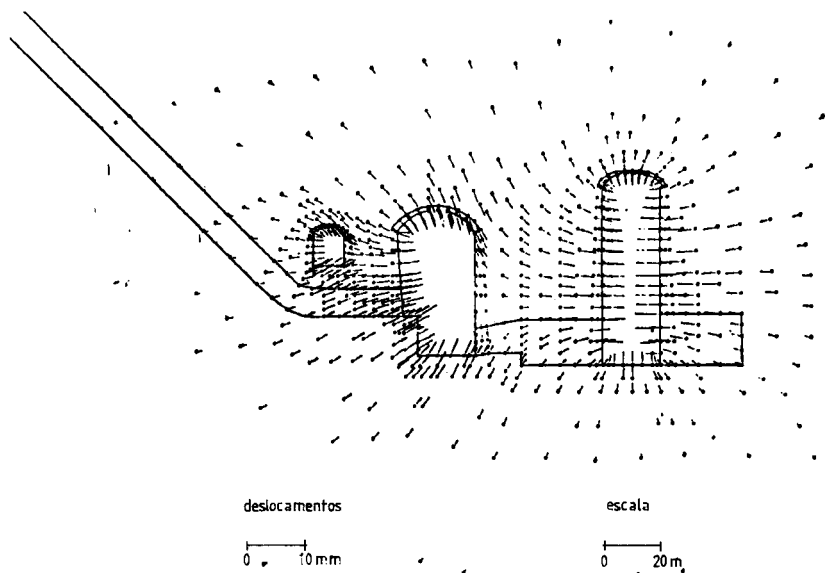


Fig. 10 -- Deslocamentos calculados pelo modelo bidimensional

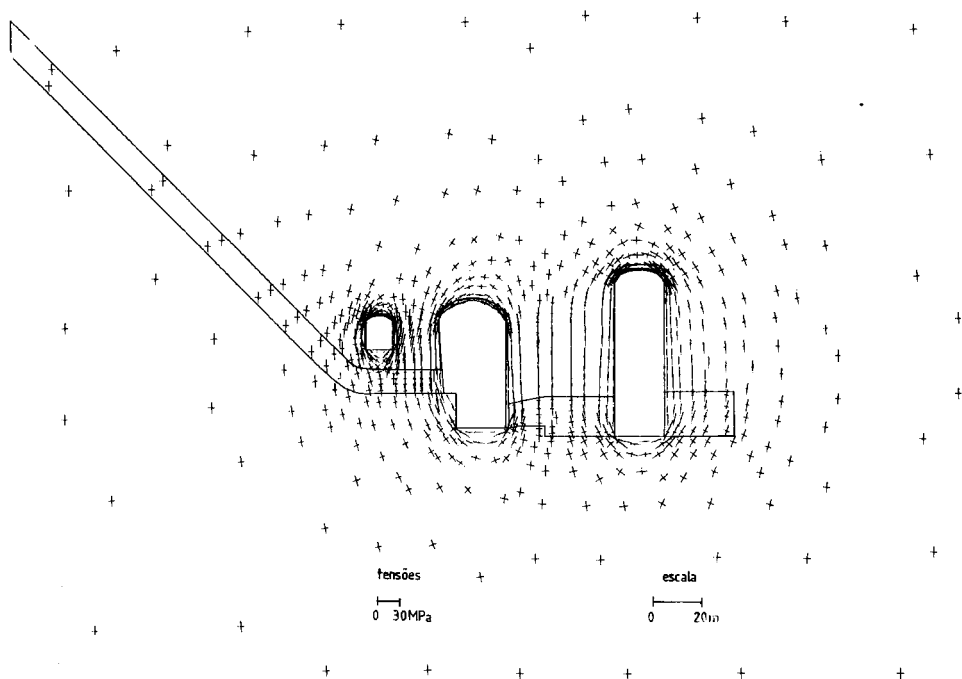


Fig. 11 Tensões principais calculadas pelo modelo bidimensional

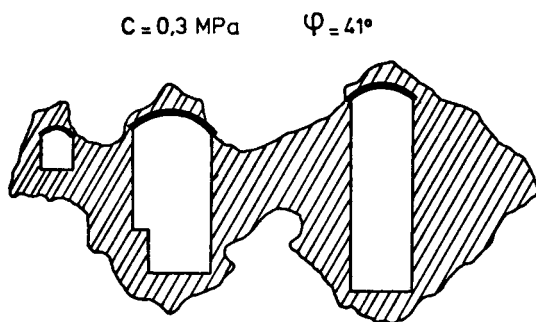


Fig. 12 — Zonas de plastificação sem ancoragens

O comportamento da central hidroeléctrica subterrânea foi analisado com base na observação da obra durante e após a abertura das cavernas (Figueiredo e Bastos, 1975). Foram seleccionadas três secções de medida e os deslocamentos observados foram determinados com base em medidas de convergência e de deformações determinados por extensómetros múltiplos (MPBX). Na Fig. 13, apresentam-se deslocamentos observados e previstos pelos modelos numéricos para a secção S_1 . Para a posição AA observou-se, após a abertura de todas as cavidades, uma divergência de 3,6 mm, que concorda razoavelmente com o valor determinado pela análise tridimensional em quatro fases. No entanto, verifica-se, na análise efectuada com o modelo plano, uma convergência de 2,1 mm. Tal contradição deverá dever-se ao facto da análise ser conduzida em apenas uma fase de escavação. Em relação aos deslocamentos determinados em pontos do interior do maciço rochoso, existe uma razoável concordância, carecendo por vezes certos valores observados de verosimilhança física.

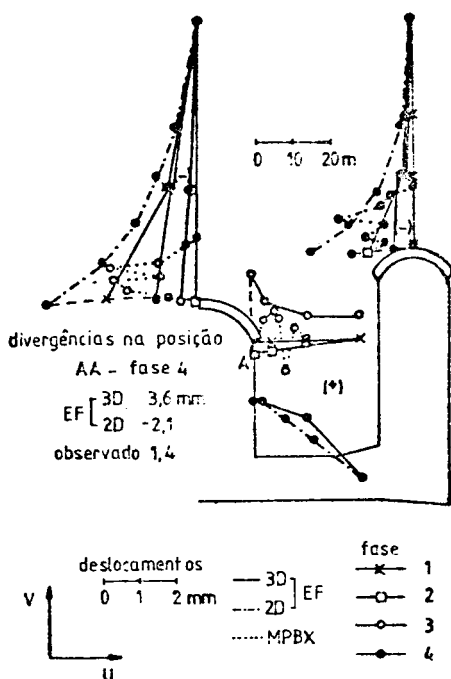


Fig. 13 - Comparação do comportamento observado e previsto

5 — CONCLUSÕES

Destaca-se, neste trabalho, a análise da problemática dos modelos de cálculo utilizados no dimensionamento das grandes obras subterrâneas, nomeadamente de cavernas para centrais hidroeléctricas, mostrando-se claramente a importância dos modelos numéricos.

Apresenta-se um modelo de cálculo tridimensional utilizando o método dos elementos finitos, tendo este modelo sido aplicado com sucesso ao complexo subterrâneo de um aproveitamento hidroeléctrico. Os resultados foram comparados com os obtidos num modelo de cálculo plano e num modelo físico tridimensional desenvolvido no LNEC e, também, com os deslocamentos obtidos durante a observação da obra.

6 — AG ADECIMENTOS

Agradece-se a colaboração de Fernan Ocampo, infelizmente desaparecido, efectuada ao nível do desenvolvimento dos programas de cálculo tridimensional por elementos finitos e do modelo de cálculo para análise da central subterrânea; e de Abel Mascarenhas pela sua acção crítica durante a elaboração desta publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BREBBIA, C. — *The boundary element method for engineers*. Pentech Press, Londres, 1978.
- CORDING, E.; HENDRON, A.; DEERE, D. — *Rock engineering for underground caverns*. Symposium on Underground Rock Chambers, Arizona, 1971.
- CUNHA, A. P. — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. Tese para especialista, LNEC, Lisboa, 1981.
- CUNHA, A. P.; SOUSA, L. — *Análise de obras subterrâneas em rocha por modelos matemáticos*. Revista Geotecnia (a publicar), Lisboa, 1983.
- FIGUEIREDO, A.; BASTOS, M. — *Observação das obras subterrâneas da barragem de Cahora Bassa*. Relatório Interno, LNEC, Lisboa, 1975.

- GOODMAN, R. E. -- *Methods of geological engineering in discontinuous rocks*. West Publishing Company, Nova York, 1976.
- LNEC -- *Estudo das fundações da barragem de Cahora Bassa*. Relatórios Internos (4), Lisboa, 1969 e 1970.
- MASCARENHAS, A. -- *Percolação na fundação de barragens de betão*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa, 1978.
- OCAMPO, F. -- *Aplicação de modelos de cálculo tridimensional na análise de grandes estruturas subterrâneas*. Relatório Interno, LNEC, Lisboa, 1982.
- OLSEN, R.; BROCH, E. -- *General design procedure for underground openings in Norway*. Rockstore' 77, Estocolmo, 1977.
- PEDRO, J.; PINA, C. -- *Estudo de equilíbrios tridimensionais em estruturas laminares e maciças utilizando elementos finitos subparamétricos*. Revista Portuguesa de Estruturas, n.º 13, Lisboa, 1982.
- RICHARDS, L.; SHARP, J.; PINE, R. -- *Design considerations for large unlined caverns at shallow depths in jointed rock*. Rockstore' 77, Estocolmo, 1977.
- ROCHA, M. -- *Estruturas subterrâneas*. LNEC, Lisboa, 1976.
- ROCHA, M. -- *Analysis and design of the foundations of concrete dams*. Memória n.º 562, LNEC, Lisboa, 1981.
- SILVEIRA, A.; AZEVEDO, M.; COSTA, P. -- *Contribuição para o estudo da central subterrânea de Cahora Bassa*. Memória n.º 430, LNEC, Lisboa, 1974.
- SOUSA, L. -- *Aplicação do método dos elementos finitos ao estudo de maciços rochosos*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa, 1974.
- SOUSA, L.; TELES, M. -- *Modelo de cálculo para estudo de túneis pelo método dos elementos finitos*. Relatório Interno, LNEC, Lisboa, 1980.