

GEOTECNIA DO COMPLEXO DE CAVERNAS SUBTERRÂNEAS DA CENTRAL DO ALTO LINDOSO*

Geotechnics of the Alto Lindoso underground powerhouse complex (Portugal)

CELSO LIMA**

J.M.COTELO NEIVA**

RESUMO - O Aproveitamento hidro-eléctrico do Alto-Lindoso pode ser considerado como dos maiores e mais recentes obras da engenharia portuguesa. A geologia e a geotecnia gerais do circuito hidráulico, a escavação das cavernas da central e a sua geologia, geotecnia, revestimento e sistema de observação são referidos.

SYNOPSIS - The Alto Lindoso hydro-electric power scheme can be considered one of the greatest and most recent achievements of the Portuguese engineering. The general geology and geotechnics of the hydraulic circuit, the excavation of caverns and their geology, geotechnics, support and observation system are referred too.

1 - INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidro-eléctrico do Alto-Lindoso situa-se na província do Minho, no norte de Portugal, muito próximo à província espanhola da Galiza, onde se estende a albufeira criada no rio Lima pela barragem de tipo abóbada com 110 m de altura (fig.1).

O circuito hidráulico é extenso (fig.1). Duas tomadas de água, uma por grupo, seguidas de curtas galerias e poços em carga, estes com 240 m de altura, continuados por duas galerias blindadas, conduzem a água à central subterrânea. Esta está situada a 350 m de profundidade e, em planta, localiza-se a jusante da barragem, cerca de 70 m a sul do encontro esquerdo. A restituição é feita por duas galerias que vão entroncar no poço da chaminé de equilíbrio, dotado com câmara de alimentação, câmara de expansão e poço de arejamento. Do poço da chaminé de equilíbrio sai uma galeria, de secção circular de 8,30 m de diâmetro e 4901 m de comprimento, que lança a água do rio Lima a cerca de 900 m a montante da velha central do Lindoso.

A partir das tomadas de água, o circuito hidráulico atravessou: em 30 metros, corneana com dobras NW-SE; depois, em cerca de 1700 m, granito médio a grosseiro de duas micas; e, até final, em 3466 m, granito porfiróide grosseiro de duas micas (fig.1).

O complexo da central subterrânea é constituído por três cavernas cujos pavimentos principais se situam entre as cotas (10,0) e (27,0).

É da geologia e geotecnia do complexo de cavernas desta central subterrânea que trata este trabalho.

(*) Comunicação apresentada ao 8º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Tóquio, Setembro, 1995

(**) Hidrorumo, Projecto e Gestão S.A.

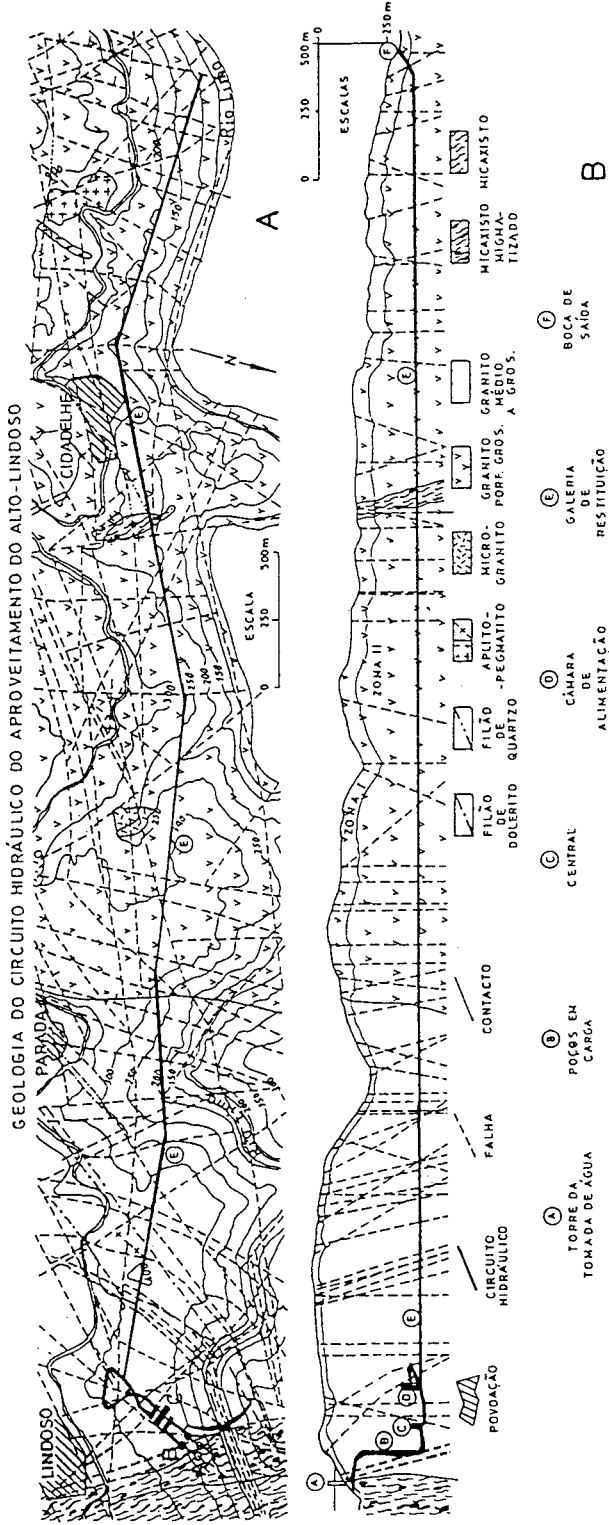


Figura 1 - Geologia e geotecnia do aproveitamento hidro-eléctrico do Alto-Lindoso.
A - planta; B - corte longitudinal.

2 - GEOLOGIA GERAL

Na região, a oeste aflora micaxisto, que contacta com granito médio a grosseiro de duas micas. Este granito contacta a cerca de 1720 m para E com granito porfiróide grosseiro de duas micas. Estes granitos são atravessados em profundidade pelo circuito hidráulico (fig.1).

O micaxisto do complexo Xisto-Metagrauváquico, anterior ao Ordovícico, é ligeiramente grafitoso, com dobras apertadas frequentemente verticais e por vezes inclinadas para WSW, de charneiras N30°-38°W com ligeiro mergulho de 4°-7° NNW (Neiva, 1977). Em profundidade, o contacto com o granito faz-se na galeria do grupo I a cerca de 90 m da tomada de água e quase no início do poço do grupo II.

O magma hercínico peraluminoso de tipo S, de que cristalizou o granito médio a grosseiro de duas micas, intruiu o micaxisto e nele imprimiu, no contacto, estreita faixa de corneana, que passa a uma facies migmatítica (embrechito epibólico), em que o ícore corresponde a vénulas quartzo-feldspáticas. Mais longe, para E, passa-se a micaxisto propriamente dito.

É no maciço de granito médio a grosseiro de duas micas que foi escavado o complexo de cavernas da central do Alto Lindoso (figs. 1 e 2). Neste granito as micas têm orientação frouxa, o mesmo acontecendo quando ocorrem fenocristais de feldspato. É um granito leucocrata, por vezes porfiróide, de textura hipautomórfica-granular, predominantemente constituído por microclina micropertítica, albite-oligoclase, quartzo, moscovite e biotite e acessoriamente por ilmenite, esfena, zircão, apatite e rútilo (Neiva, 1977).

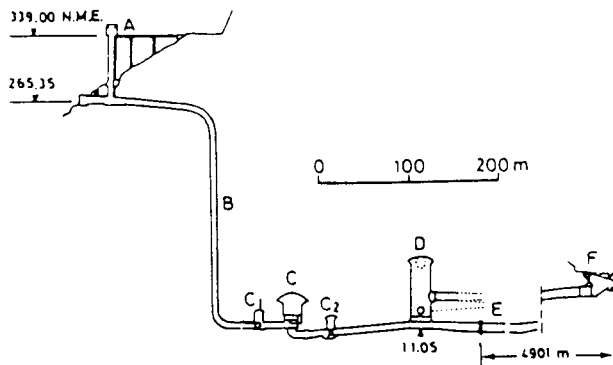


Figura 2 - Corte longitudinal do circuito hidráulico. A - torre da tomada de água; B - poços em carga; C1 - caverna das válvulas esféricas; C - caverna da central; C2 - caverna das válvulas borboleta; D - câmara de alimentação; E - galeria de restituição; F - boca da saída.

As famílias de diaclases do maciço deste granito, observáveis à superfície, vão indicadas no Quadro I. Conforme o estado de conservação da rocha se vai degradando por meteorização, o espaçamento das diaclases da mesma família vai diminuindo, e, portanto, o número de diaclases por unidade de volume vai aumentando.

Filões de aplito e pegmatito são pouco extensos, mais frequentes na zona de contacto do granito com o micaxisto, dispondo-se segundo: a) N30°-50°E, 65°-90°NW, possança de 0,05 -

1,30 m; b) N10°E-N15°W, 65°-90°W, possança 0,05 - 4,00 m; c) N35°-50°W, 67°-90°NE, possança de 0,05 - 5,00 m; d) N80°-96°E, 80°-90°N, possança de 0,10 - 4,00 m. Uns são coincidentes com diaclases e outros com falhas.

Filões de quartzo, pouco frequentes e pouco extensos, de possança 0,05 a 0,60 m, coincidentes com diaclases e por vezes com falhas, têm atitudes: a) N30°-50°E, 60°NW-90°-50°SE; b) N25°-45°W, 66°-90°ENE; c) N20°W-N17°E, 70°E-90°-80°W.

Filões e diques de dolerito N41°-56°E, 63°-90°NW e de 1,00 - 1,50 m de possança, muito extensos, atravessam pegmatitos mas são cortados por filões de quartzo.

Falhas cortam o micaxisto e o granito médio a grosseiro de duas micas (fig. 1), e as observadas à superfície foram agrupadas em famílias referidas no Quadro II.

Quadro I - Principais famílias de diaclases do granito de grão médio e grosseiro de duas micas

Família	Direcção	Pendor	Espaçamento (m)	Continuidade	Rugosidade	Frequência (%)
A	N25°-50°E	50°NW-90°-60°SE	0,10-4,50	elevada	ligeira	37
B	N15°W-15°E	60°W-90°-65°E	0,10-2,50	elevada	ligeira	23
C	N60°-80°E	55°NW-90°-55°SE	0,50-2,50	elevada	ligeira	16
D	N65°-100°W	35°S-0°-30°N	0,10-1,50	média	rugosa	12
E	N20°-50°W	60°SW-90°-60°NE	0,40-3,00	pequena	rugosa	8
F	N70°-85°W	60°SW-90°-78°NE	1,30-3,50	pequena	ligeira	2
G	N20°-50°E	30°SE-0°-25°NW	0,40-2,50	pequena	rugosa	1
H	N20°-50°W	35°SW-0°-20°NE	0,20-1,00	pequena	rugosa	1

Quadro II - Famílias de falhas no micaxisto e no granito médio a grosseiro de duas micas

Família	Direcção	Pendor	Espessura	Frequência	Enchimento
A	N20°-50°E	56°NW-90°-70°SE	0,02-0,50	49	Milonite argilosa
B	N10°W-8°E	50°W-90°-60°E	0,02-0,40	23	Milonite argilosa
C	N60°-90°E	55°NNW-90°-72°SSE	0,05-0,35	16	Milonite argilosa
D	N85°-90°W	80°N-90°-77°S	0,01-0,12	6	Milonite argilosa e albite (3)
E	N35°-50°W	80°SW-90°-77°NE	0,01-0,30	4	Milonite argilosa
F	N30°E	15°NW	0,15-0,20	1	Milonite argilosa e albite (3)
G	N80°E	37°S	0,20-0,40	1	Milonite argilosa e albite (3)

Sondagens mecânicas efectuadas com sonda rotativa provida de coroa de diamantes e tubo amostrador de paredes duplas, permitiram reconhecer até profundidades de 29 a 103,5 m as estruturas geológicas (diaclases e falhas), rochas filonianas e o estado de alteração das rochas.

Genericamente, no maciço granítico do complexo das cavernas e nas suas proximidades SW e W, o granito bem conservado (W_{1-2}) é atingido entre 33 e 38 m de profundidade, conservando-se assim até pelo menos 103,5 m de profundidade; as falhas, até estas profundidades, mantêm-se muito aproximadamente com as mesmas características que à superfície (Neiva et al., 1983). Isso permitiu, no corte geológico segundo o desenvolvimento do circuito hidráulico, marcar em profundidade as falhas encontradas à superfície e o zonamento do maciço rochoso (fig. 1b).

Com o transporte geométrico-estrutural para profundidade à cota 27,00 das falhas observadas à superfície do maciço granítico (diversas cortadas por sondagens rotativas em profundidade até 103,5 m), e tendo em consideração o diagrama de conjunto das famílias de diaclases, foi possível orientar convenientemente o circuito hidráulico e marcar a melhor localização e disposição do complexo de cavernas da central a 350 m de profundidade (fig.2), a chaminé de equilíbrio, a câmara de alimentação, a câmara de expansão e a galeria de restituição (Neiva et al., 1983).

As sondagens verticais RV4, H8, H9, RV1 e as sondagens inclinadas H1, D3, D4 e S1 (Tecnasol, 1977) permitiram estabelecer o zonamento do maciço granítico interessando ao complexo de cavernas da central (fig.1). Esse zonamento mostrou que as cavernas seriam escavadas na Zona III, caracterizada por granito W_{1-2} , com predomínio de W_1 , fracturação F_{1-2} (Neiva et al. 1983 e 1991), com módulo de deformabilidade de 24,5 - 55,9 GPa, tensão de rotura de 79,9 - 166 MPa, coeficiente de Poisson de 0,05 - 0,07, porosidade de 1,18 - 0,84% e velocidade das ondas longitudinais ultrassónicas de 3922 - 4890 m/s (LNEC, 1977).

3 - O RECONHECIMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DAS CAVERNAS

Uma galeria de acesso à central, com desenvolvimento de 1771 m, secção livre de cerca de 60 m² em forma de ferradura, de soleira horizontal com 7,85 m de altura, pendendo a 11% e com dois patamares intermédios, permitiu o ataque ao complexo de cavernas, chaminé de equilíbrio e troço montante da galeria de restituição. Quando a galeria de acesso atingiu o nível da central, foi escavada uma galeria piloto de prospecção ao longo do eixo da caverna. A galeria de acesso foi ainda prolongada até às entradas das cavernas da câmara de válvulas esféricas e da câmara de válvulas borboleta. As três galerias (fig. 3) mostraram granito médio a grosseiro de duas micas, W_{1-2} , F_{1-2} , predominantemente W_1, F_{1-2} , com RQD médio de 90% e RMR=80.

Na parede sul da galeria de acesso, junto à entrada da galeria de prospecção geológica da caverna da central, em zona um pouco abalada pelo fogo, abriu-se uma câmara onde foram efectuados testes de deformabilidade pelo método LFJ (Large Flat Jack), obtendo-se valores do módulo de deformabilidade de 88 - 118 GPa na direcção vertical e de 52 - 84 GPa na direcção horizontal (LNEC, 1988; Sousa et al., 1988). A relação entre os valores médios dos módulos de deformabilidade na horizontal (90 GPa) e na vertical (58 GPa) é de 1,6. O maciço rochoso evidenciou um comportamento aproximadamente elástico e linear.

Os ensaios para determinação do estado de tensão “in situ” pelo método SFJ (Small Flat Jack) foram efectuados numa câmara, especialmente escavada para o efeito, localizada na galeria de acesso à caverna das válvulas borboleta e em dois locais desta mesma galeria (fig.3). Em rasgos verticais, obtiveram-se valores da tensão normal de 4,4 e 7,7 MPa e em rasgos horizontais valores variáveis entre 4,0 e 20,9 MPa, desprezando neste caso um dos valores por ser considerado anómalo (LNEC 1988; Sousa et al., 1988).

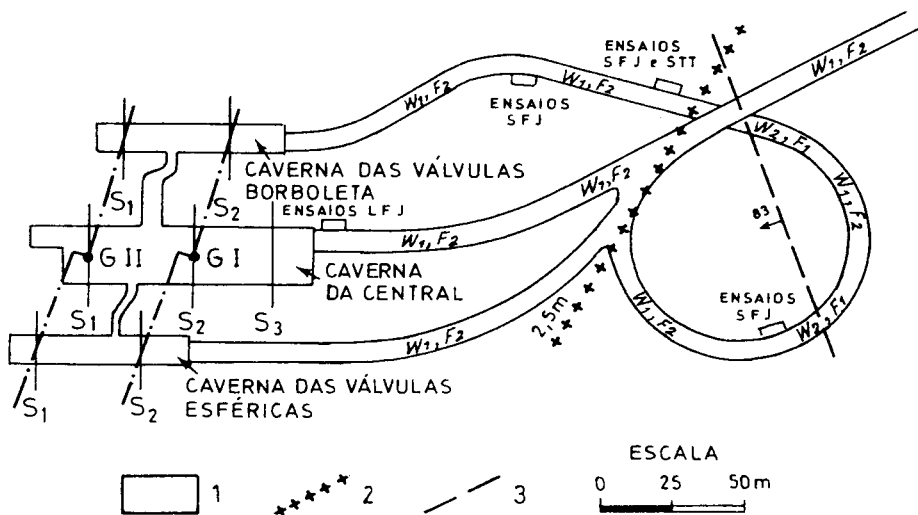


Figura 3 - Complexo de cavernas da central, túneis de acesso e locais onde se efectuaram ensaios mecânicos. S₁, S₂, S₃ - secções de observação das cavernas; 1 - granito médio a grosseiro de duas micas; 2 - filão dolerítico; 3 - falha

Também foram efectuados ensaios em furos de sonda pelo método STT (Stress Tensor Tube) na câmara onde se realizaram os ensaios SFJ. Com base no conjunto dos resultados obtidos, foi determinado o estado de tensão global mais provável, que conduziu aos seguintes valores das tensões principais: $\sigma_1 = 14,2$ MPa na direcção $007^\circ/61^\circ$ (azimute/pendor), $\sigma_2 = 10,6$ MPa na direcção $135^\circ/18^\circ$ e $\sigma_3 = 6,0$ MPa na direcção $232^\circ/21^\circ$ (Sousa et al., 1988). A tensão vertical calculada foi de 7,7 MPa, valor bastante próximo mas inferior ao resultante do recobrimento granítico, enquanto as tensões horizontais apresentaram valores relativamente próximos de 12,6 e 10,7 MPa, correspondendo-lhes a razão de 1,5 entre a tensão média horizontal e a tensão vertical (LNEC 1988; Sousa et al., 1988).

Perfis obtidos por prospecção microsísmica de refração segundo alinhamentos paralelos ao eixo de caverna da central, utilizando bases sísmicas de pequeno comprimento, permitiram determinar velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais e calcular os módulos de elasticidade dinâmica variando entre 74 e 78 GPa.

Sobre tarolos provenientes dos locais dos ensaios LfJ, dos ensaios STT e de tarolos recolhidos na galeria de prospecção da central através de sondagens curtas, foram preparadas amostras para ensaios laboratoriais. Ensaios de compressão não confinada sobre prismas $4 \times 4 \times 10$ cm deram resultados de 60 GPa como valor médio do módulo de deformabilidade e 140 MPa como valor médio das tensão de rotura. A anisotropia do módulo de deformabilidade pode ser representada por um elipsoide ortotrópico de três eixos. Nos ensaios de deslizamento sobre diaclases, os valores médios determinados foram de 0,08 MPa para a coesão e de 0,740 para a $\tan \phi$ (Sousa et al., 1988).

As observações geológicas e os resultados dos ensaios geotécnicos nas galerias de pesquisa vieram confirmar o que fora previsto quando da elaboração do projecto do complexo

de cavernas do circuito hidráulico: maciço granítico de boa qualidade e de excelentes propriedades mecânicas (Neiva et al., 1983).

4 - ESCAVAÇÃO DAS CAVERNAS. SUA GEOLOGIA E GEOTECNIA

A primeira caverna a ser escavada foi a da central de eixo com orientação $S70^{\circ}E$, tendo-se começado pela abóbada. Ao nível 27,00 do pavimento principal, a caverna tem 91,00 m de comprimento, 20,85 m de largura, largura essa que ao nível de inserção da abóbada é de 33 m por necessidade de garantir um pé direito livre de 6 m acima do caminho de rolamentos. A altura é de 23,0 m entre a abóbada e o pavimento principal, mas atinge 49 m de altura máxima considerando aqueles 23,0 m e a profundidade dos poços onde em cada um se instalou uma turbina Francis de 317 MW e um gerador de 350 MVA.

A escavação da caverna da central começou com a execução na abóbada de duas galerias laterais (Abril de 1988), e outras de interligação entre estas onde foram instalados de imediato extensómetros múltiplos. Depois da escavação do núcleo (completada em Setembro de 1988), foi executado no tecto uma abóbada em betão armado que incluiu duas vigas longitudinais, ancoradas no maciço, para suporte do caminho de rolamentos, após o que se realizou a escavação final da central (concluída em Novembro de 1989). Como suporte nas paredes utilizou-se pregagem sistemática (varões selados com calda de cimento) e betão projectado.

Paralela a esta caverna, com afastamento de cerca de 19 metros entre hasteais, foi escavada do lado de montante, entre Março de 1988 e Junho de 1989, a caverna das válvulas esféricas. Tem 60,00 m de comprimento, 9,80 m de largura e 20,00 m de altura. No tecto, como suporte primário, utilizou-se, em zonas localizadas, betão projectado, rede metálica e pregagem selada com calda de cimento e, como suporte final, foi construída uma abóbada em betão sobre cada uma das válvulas. Nas paredes aplicou-se sistematicamente betão projectado e em áreas restritas utilizou-se rede metálica e varões de aço selados com calda de cimento.

Ainda disposta paralelamente à caverna da central, situando-se o seu eixo 43,0 m a jusante do eixo dos grupos, escavou-se, de Setembro de 1988 a Dezembro de 1990, a caverna das válvulas borboleta, com 63,00 m de comprimento, 9,63 m de largura, e 24,40 m de altura máxima na zona das fossas, onde ficam instaladas as válvulas, e de 15,60 m na parte restante. Também no tecto e sobre as válvulas foram construídas abóbadas em betão para protecção contra a queda fortuita de blocos de rocha, enquanto na parte restante foi aplicado betão projectado. Nos hasteais, devido à boa qualidade do maciço rochoso e ao cuidadoso processo de escavação, empregando a técnica de pré-corte, foram utilizadas só ocasionalmente pregagens seladas com calda de cimento como suporte primário.

Embora fossem objecto de observação, a geologia e a geotecnia das cavernas e das galerias próximas, conforme iam sendo escavadas, concluída a escavação de cada um destes elementos foi feito o seu cuidadoso levantamento geológico-geotécnico (fig.4). As famílias de diaclases encontradas nas cavernas eram as mesmas que as observadas à superfície. Nas cavernas não foram cortadas falhas. Contudo, no canto SW da abóbada da central notou-se ligeira tectonização, com maior fracturação local, (F_{3-4}), que corresponde à orientação de uma estreita falha inferida (Neiva et al., 1983), mas que não é uma falha realmente presente.

Genericamente, nesta caverna e nas outras duas cavernas domina granito W_{1-2} , F_{1-2} , com algumas porções localizadas de W_2 , F_{2-3} e raramente F_{3-4} devido a maior concentração de diaclases subhorizontais (fig.4).

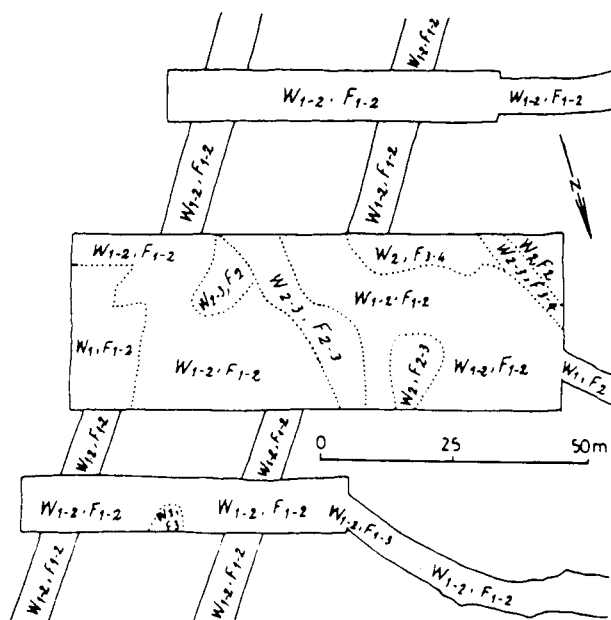


Figura 4 - Caracterização geotécnica do complexo de cavernas da central

Na caverna da central foi detectada uma maior frequência de descontinuidades F_{3-4} no canto SW. Uma faixa NNW-SSE de cerca de 7 m de largura, situada aproximadamente a meio da caverna, e uma pequena bolsada a W desta têm descontinuidades F_2 e por vezes F_{2-3} , mas de granito W_2 ou W_{2-3} (fig.4).

Na caverna das válvulas esféricas e na caverna das válvulas borboleta, o granito escavado foi W_{1-2} , F_{1-2} , com predomínio de W_1 , embora naquela, a Norte, fosse encontrada uma pequena bolsada de granito W_1 , F_3 (fig.4)

Em ensaios laboratoriais efectuados sobre amostras do granito do tecto da caverna da central, recolhidas durante a construção, obteve-se o valor médio do módulo de deformabilidade de 134 MPa.

No complexo de cavernas da central, foram feitas medidas de convergência e de deslocamentos no interior do maciço granítico, em três secções principais perpendiculares às cavernas, utilizando convergenciómetro (LNEC) e extensómetros múltiplos (fig.s 3 e 5) respectivamente. As secções S_1 e S_2 , que passavam pelo eixo das válvulas dos respectivos circuitos, incluíam doze extensómetros, enquanto a secção S_3 comportava somente os extensómetros numerados de 4 a 9.

As medidas de convergência mostraram deslocamentos da ordem dos 4,9 mm em Agosto de 1989. Os deslocamentos totalizaram 6,2 mm em Setembro, 8,6 mm em Novembro de 1989 e de 8,9 mm em Março de 1991. A estabilização foi praticamente atingida em Janeiro de 1990, com valores que genericamente corresponderam aos previstos através dos modelos numéricos de elementos finitos utilizados para estudo das deformações do complexo das cavernas quando das escavações (Macedo et al., 1992). O comportamento das cavernas foi excelente.

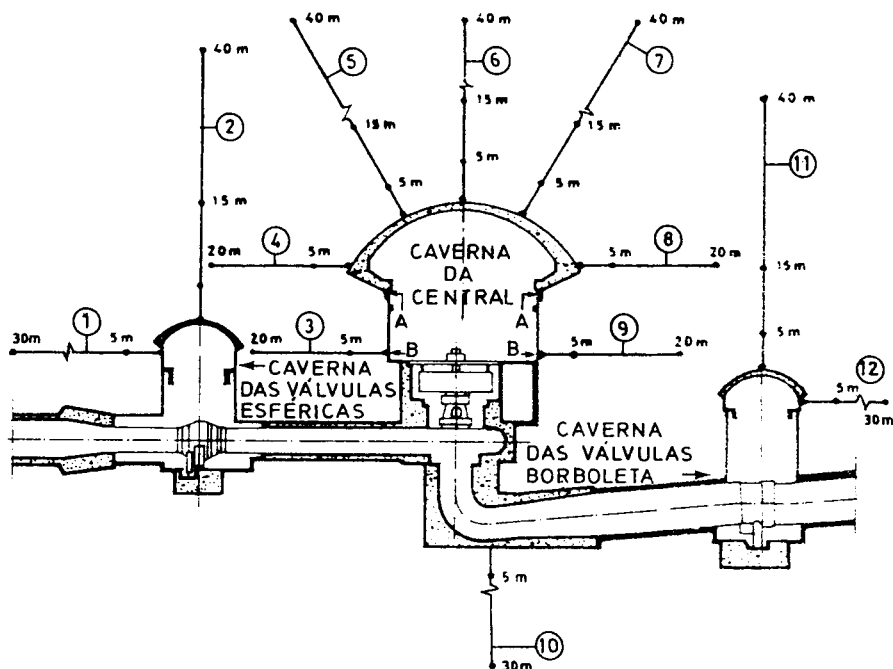


Figura 5 - Corte longitudinal do complexo de cavernas da central, com indicação dos extensómetros múltiplos e dos locais de medidas de convergência (A-A, B-B)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LNEC - *Colaboração no estudo geotécnico do maciço interessado pelo circuito hidráulico do aproveitamento do Alto Lindoso*. Relatório não publicado, Lisboa, 1977.
- LNEC - *Observação das obras subterrâneas do empreendimento hidro-eléctrico do Alto-Lindoso. Caracterização do maciço rochoso e determinação do estado de tensão in situ*. Relatório não publicado, Lisboa, 1988.
- LNEC - *Observação dos trabalhos subterrâneos do esquema hidro-eléctrico do Alto-Lindoso. Resultados obtidos durante a construção em 1989 e 1990*. Relatório não publicado, Lisboa, 1994.
- Macedo, R., Monteiro, G., & Sousa, L. - *Observation of the underground structures of Alto Lindoso hydroelectric scheme*. ISRM Symposium: Eurock'92, Rock Charac., pp. 420-425, 1992.
- Neiva, J.M.C - *Geologia do local da barragem e órgãos anexos do aproveitamento do Alto-Lindoso*. Relatório não publicado. EDP - Porto, 1977.
- Neiva, J.M.C., Guimarães, J.N., & Azevedo, M.M. - *Geology of the hydraulic circuit of the hydro-electric development of Alto Lindoso (Portugal)*. Inst. Symp. Eng. Geol. and Undergr. Constr., Lisboa, Vol.3, pp. 131-139, 1983.
- Neiva, J.M.C. - *Anteprojecto do escalão do Alto-Lindoso. Geologia da região dos circuitos hidráulicos*. Relatório não publicado. EDP, Porto., 1983