

EMPREENDIMENTO HIDROELÉCTRICO DE CAHORA-BASSA: NOVO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO*

Cahora-Bassa hydroelectric scheme: A new monitoring plan

L.R. SOUSA**

J. MORA RAMOS**

H.S. SILVA***

RESUMO - A barragem de Cahora-Bassa localiza-se no rio Zambeze, Moçambique, inserindo-se num empreendimento de fins múltiplos. Descrevem-se as características gerais do empreendimento, assim como a geologia e os estudos efectuados para caracterização geotécnica do maciço rochoso. Apresenta-se, ainda, o sistema de observação inicialmente estabelecido e o seu complemento recente.

SNOPSIS - The Cahora-Bassa dam is located on the river Zambeze, Mozambique, forming part of a multi-purpose scheme. The general characteristics of the scheme are described, as well as the geology and studies for the geotechnical characterization of the rock mass. The monitoring plan initially planned, and its complement are also presented.

1 - INTRODUÇÃO

O empreendimento hidroeléctrico de Cahora-Bassa localiza-se em Moçambique, num trecho do rio Zambeze. Compreende uma barragem abóbada com 170m de altura máxima e um importante complexo de obras subterrâneas que inclui, entre outras obras, uma central de grande dimensões.

O maciço rochoso de fundação é constituído por gnaisses graníticos com alguns filões lamprofíricos e gabróicos. A caracterização geotécnica do maciço foi analisada com particular atenção pelo LNEC, tendo sido efectuado um vasto programa de ensaios.

O sistema de observação planeado inicialmente incluía a observação da barragem e sua fundação, das obras subterrâneas e das encostas. Posteriormente, face à necessidade de adequar o sistema de observação aos cenários correntes de comportamento e à substituição de aparelhos que se tornaram inoperacionais, procedeu-se ao reforço do sistema de observação das várias obras envolvidas.

Neste artigo, descrevem-se as características gerais do empreendimento, bem como os aspectos relacionados com a caracterização geotécnica do maciço rochoso, e o sistema de observação inicialmente instalado e o seu complemento posterior.

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

(**) Engenheiro Civil, Investigador Coordenador do LNEC

(***) Geólogo, Investigador Auxiliar do LNEC

2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO EMPREENDIMENTO DE CAHORA-BASSA

2. 1- Considerações gerais

A barragem de Cahora-Bassa insere-se num empreendimento projectado com fins múltiplos, com vista à regularização dos caudais do rio Zambeze, à produção de energia eléctrica, à garantia de navegabilidade do rio quer a montante, numa extensão de cerca de 300km até à fronteira com o Zimbabwe, quer a jusante, e ao controlo das cheias artificiais provocadas pelas descargas da barragem de Kariba, no Zimbabwe, e retenção dos caudais sólidos (Figura 1), (HP, 1965). O reservatório criado tem uma capacidade de armazenamento de 63Nm^3 cobrindo uma área com $2,7 \times 10^3 \text{km}^2$ que atinge cerca de 270km de extensão e 38km de largura máxima.

Os estudos para a criação do empreendimento iniciaram-se em 1956, tendo a construção começado em 1971 e terminado em 1974. O primeiro enchimento do reservatório ocorreu entre Dezembro de 1974 e Junho de 1976, tendo-se iniciado a exploração comercial do empreendimento em Março de 1977.

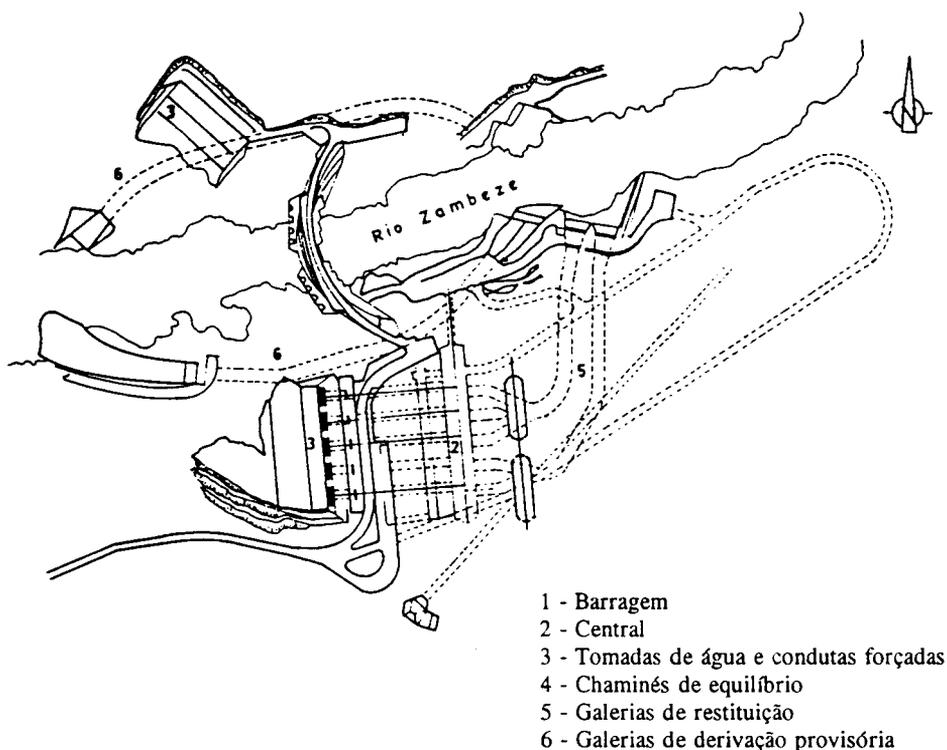


Figura 1 - Planta do empreendimento de Cahora-Bassa

2.2 - Barragem

A barragem está implantada numa estreita garganta, cuja secção apresenta na parte inferior vertentes quase verticais até próximo da cota de coroamento. É uma estrutura em betão do tipo abóbada de dupla curvatura, com as seguintes características geométricas (Figura 1): 170m de altura máxima, 300m de desenvolvimento no coroamento, 1,54 de relação corda-altura, 4 e 23m de espessura da consola central, respectivamente, no coroamento e na base.

Possui 8 descarregadores de meio fundo no corpo da barragem, com capacidade total de escoamento de $14 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{seg}$ para a cota de máxima cheia, e um descarregador de superfície tipo "volet" situado nos blocos centrais da barragem.

2.3 - Obras subterrâneas

O complexo de obras subterrâneas da barragem, na margem direita do rio, situa-se a uma profundidade que, no caso da central, varia de cerca de 130m numa extremidade a 230m na outra, correspondendo às dimensões características desta caverna um comprimento de 216,7m, uma largura de 28,9m e alturas mínima e máxima de 24 e 57m, respectivamente. As duas chaminés de equilíbrio, implantadas paralelamente à central, apresentam as seguintes dimensões características: comprimento de 82,5 e 87,7m para as chaminés norte e sul, respectivamente; largura de 19,0m para ambas; e alturas de 72,0 e 70,3m para as chaminés norte e sul, respectivamente.

A Figura 2 ilustra uma perspectiva esquemática do complexo destas obras (Silveira et al., 1974).

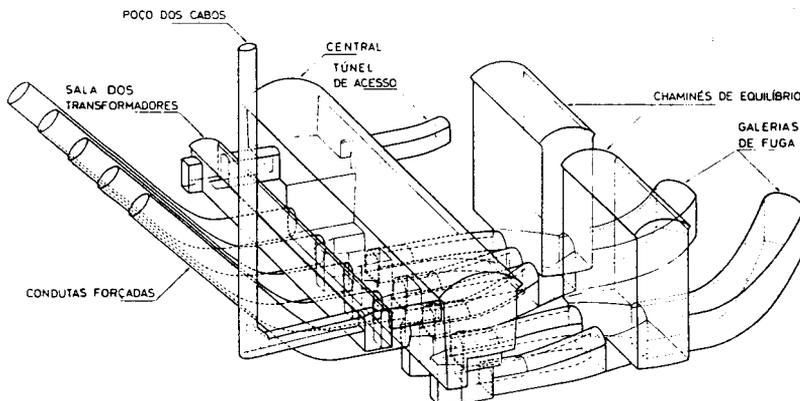


Figura 2 - Perspectiva das obras subterrâneas da central de Cahora-Bassa

2.4 - Encostas

O vale onde corre o rio apresenta no local da barragem uma fisiografia constituída por um entalhamento, que impôs a formação de uma garganta de paredes quase verticais até à cota

260m (o coroamento da barragem situa-se à cota 330m). Acima desta cota, o vale torna-se ligeiramente assimétrico em consequência da menor inclinação da vertente da margem direita, voltando a observar-se simetria do vale acima da cota 380m. Trata-se de um vale ainda jovem, onde, a montante do local onde está implantada a barragem, o rio escavou um canhão bastante apertado e controlado tectonicamente. Os cumes dos morros, que constituem as margens na zona próxima da barragem, atingem cotas da ordem de 700-800m.

Dada a actividade tectónica da região, toda a área ocupada pela barragem e respectivo reservatório ao longo das margens do canhão situado a montante, numa extensão de 7km, deve ser considerada dinamicamente activa e susceptível de propiciar condições de risco de deslizamento ou de desmoronamento de massas rochosas.

3 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO

3.1 - Condicionamento geológico

Cahora-Bassa situa-se na região oriental de África, numa zona em que a principal actividade sismo-tectónica resulta do sistema de riftes continentais. A actividade sísmica que ocorre nesta região resulta da libertação de tensões concentradas em determinadas zonas de fractura, com basculamento de falhas normais e falhas de desligamento provocadas por tensões de corte.

No local onde está implantado o empreendimento, ocorrem formações do Precâmbrico superior constituídas predominantemente por rochas de tendência granítica e, em áreas de reduzida expressão, por rochas gabro-dioríticas e granulitos, que são atravessadas por veios de aplito, de pórfiro e de pegmatito e por filões lamprofíricos e gábricos. As rochas com maior expressão local são as de tendência granítica, que incluem granitos com amplas características texturais e granulométricas, apresentando frequentemente disposição orientada dos minerais, por vezes francamente gnáissica. Ter-se-ão processado na região três fases tectónicas que originaram a compartimentação do maciço, tendo sido reconhecidas algumas falhas sem grande expressão geotécnica e três famílias principais de diaclases, duas das quais subverticais e uma subhorizontal (Figura 3).

3.2 - Caracterização mecânica e hidráulica

O LNEC participou activamente no estudo geotécnico do maciço rochoso, que, numa fase inicial, consistiu no:

- i) estudo da deformabilidade e fluência do maciço rochoso e das rochas constituintes da fundação da barragem;
- ii) estudo das características de corte e de deslizamento das diaclases e da anisotropia das rochas constituintes da fundação;
- iii) estudo das tensões internas do maciço rochoso no local da central subterrânea;
- iv) e estudo do avanço das galerias e dos furos de sondagem com vista a uma melhor caracterização mecânica do maciço rochoso.

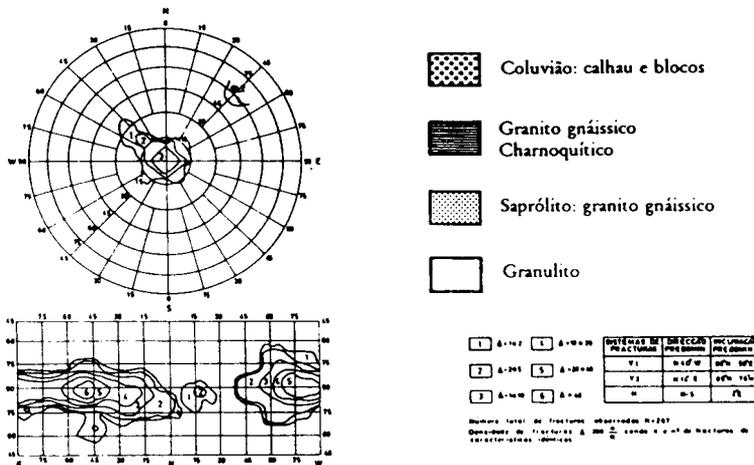
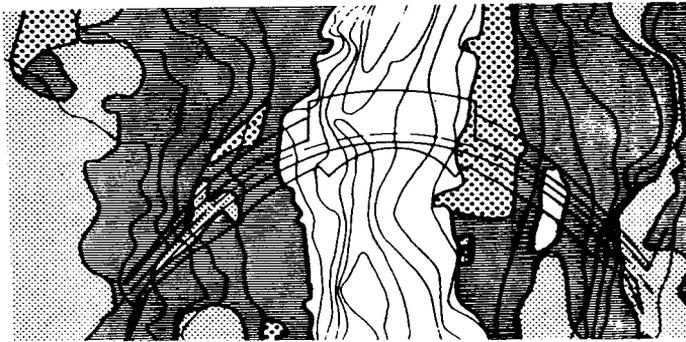


Figura 3 - Geologia do local da barragem e das obras subterrâneas

Apresenta-se, na Tabela 1, uma síntese global de alguns dos parâmetros mais significativos referentes aos módulos de elasticidade do maciço rochoso, determinados in situ e em laboratório (Silva, 1989). As tensões iniciais, estimadas a partir de ensaios SFJ numa galeria de reconhecimento da central, apresentaram tensões principais máximas entre 13 e 18MPa e tensões principais mínimas entre 9 e 12MPa.

A permeabilidade do maciço determinada através de ensaios de injeção de água tipo Lugeon era globalmente baixa. Os valores mais elevados ocorriam na zona superficial do maciço, naturalmente mais descomprimido, e em zonas intermédias da margem esquerda onde se determinaram valores da ordem de 5 unidades Lugeon. O tratamento de consolidação e impermeabilização efectuada garantiu uma redução significativa da permeabilidade nessas

zonas. Foi feita, ainda, uma análise das características hidromecânicas e geoquímicas do maciço rochoso de fundação (Silva, 1989).

Tabela 1. Módulos de elasticidade determinados in situ e em laboratório (em GPa)

Tipo de rocha	$E_{\text{unst.}}$ in situ	$E_{\text{inst.}}$ Laboratório	E_{∞} in situ
granito	76	73	57
granulito	36	56	30
gabro	-	108	-
lamprófiro	-	35	-

4 - SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO

4.1 - Sistema inicial

Para observação da sismicidade natural e induzida pela criação do reservatório, foi instalada uma rede de observação sismológica apoiada em 5 sismógrafos instalados em pontos das margens estrategicamente definidos. A informação foi registada até 1978, tendo a rede sido desmantelada posteriormente devido a dificuldades de operação. Durante o primeiro enchimento não se registou actividade sísmica assinalável.

Para observação do comportamento e controlo de segurança estrutural da barragem e fundação foi idealizado e instalado um sistema de observação que permite: i) no corpo da barragem, a determinação de deslocamentos horizontais e verticais, extensões e tensões, temperaturas e movimento das juntas de contracção; ii) na fundação, relativamente ao comportamento mecânico, a determinação de deslocamentos horizontais na base da barragem, através de pêndulos, e deslocamentos no interior do maciço, através de fios de fundação fixados a profundidades que atingem 40m, e, relativamente ao comportamento hidráulico, a medição de subpressões em 7 grupos de piezómetros com câmaras de pressão instaladas a várias profundidades, definindo perfis montante-jusante, e a medição dos caudais vertidos por uma extensa rede de drenagem distribuída pela galeria da base da barragem e pelas galerias abertas no maciço rochoso. Na Figura 4, representa-se o sistema de observação da fundação descrito (Ramos et al., 1991).

O Plano de observação estabelecido para as obras subterrâneas compreendeu: i) a medição de deformações do maciço rochoso, nomeadamente de convergências entre hasteais de cavidades e de deslocamentos relativos entre pontos do maciço rochoso; ii) a medição de tensões instaladas na rocha, quer nas paredes das cavidades, quer no interior do maciço; e iii) a medição de tensões no betão das abóbadas.

Foram definidas três secções principais de medida (Sousa et al., 1994). A medição de deslocamentos relativos do maciço rochoso foi empreendida por intermédio de extensómetros múltiplos de fio, tendo sido instalados 9 extensómetros na central, 6 na sala de transformadores e, em cada chaminé de equilíbrio, 2 extensómetros. Para medição de convergências entre hasteais, foram definidas 6 estações de leituras para a central, 3 na sala de transformadores e, nas chaminés de equilíbrio, 4 estações, tendo sido utilizado um

convergenciómetro de fita. Para medição do estado de tensão nas paredes das cavidades, foram efectuados vários ensaios com macacos planos de pequena área do tipo SFJ (Small Flat Jack), de modo a permitir a quantificação do estado de tensão em vários locais das cavidades. Na fase de construção, foi possível efectuar ensaios SFJ no túnel de acesso à central, na sala de transformadores e na central. Posteriormente, foram, ainda, efectuados ensaios numa galeria entre a central e a chaminé de equilíbrio norte. A observação de tensões no betão foi feita apenas na abóbada da central, utilizando extensómetros do tipo Carlson. A partir de 1974, deixou de se ler estes aparelhos por falta de acesso e de disponibilidade em meios humanos. Para além das observações referidas para as obras subterrâneas, foram instaladas células de pré-esforço em quatro ancoragens na galeria de acesso às chaminés de equilíbrio.

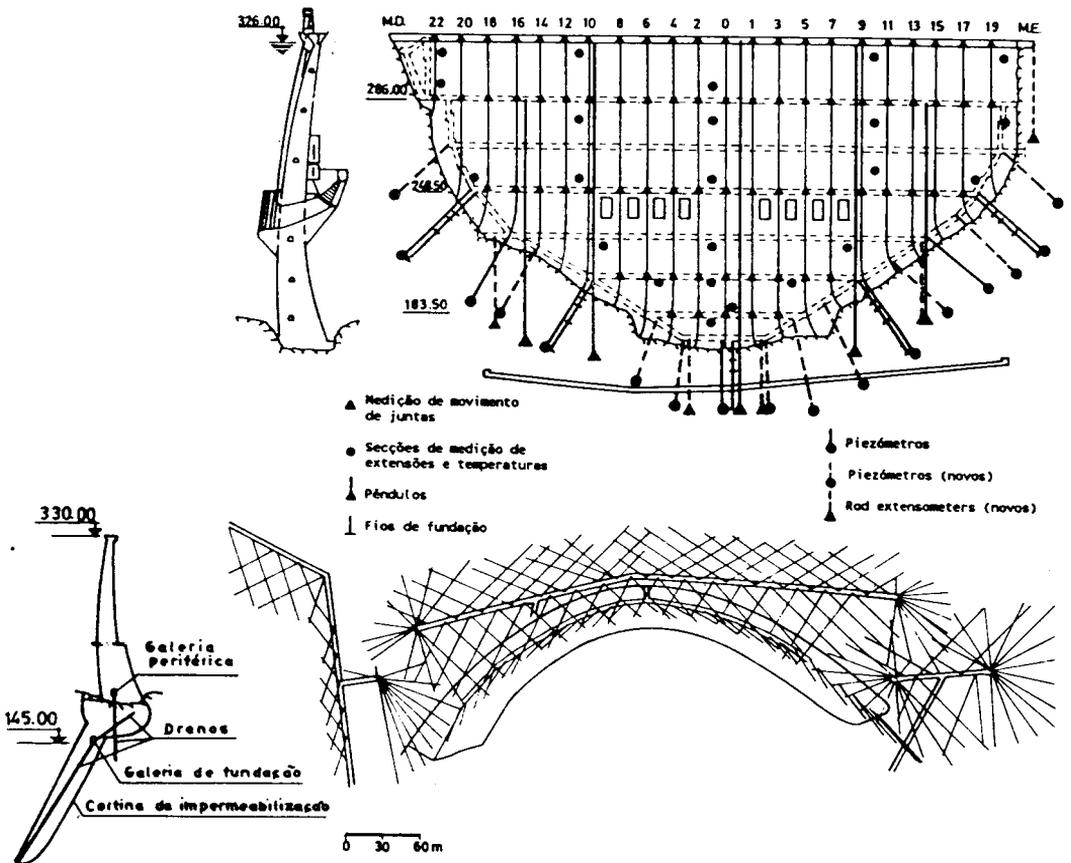


Figura 4 - Sistemas de observação da barragem e fundação

Finalmente, para as encostas, tendo em consideração os aspectos geológicos e geotécnicos referidos, consideraram-se dois sectores, um compreendendo a zona envolvente da barragem e central e outro, a montante deste, envolvendo as margens do reservatório ao longo do canhão. numa extensão de cerca de 7km. O acompanhamento do comportamento das encostas no primeiro sector apoia-se: na medição de deslocamentos planimétricos por métodos de geodesia de posição; na medição das tensões instaladas em algumas das ancoragens pré-esforçadas colocadas nas encostas da zona imediatamente a jusante da inserção da barragem, na medição de caudais ressurgentes; e na realização de inspecções visuais. O acompanhamento do comportamento das margens do reservatório no segundo sector é feito através da medição de deslocamentos planimétricos por métodos de geodesia de precisão e através de inspecções visuais periódicas.

4.2 - Complemento ao sistema inicial

O sistema de observação inicial foi projectado em princípios da década de setenta. A deterioração de alguns equipamentos, a necessidade de adequar o sistema à observação do comportamento evidenciado, às possíveis consequências no comportamento hidráulico e mecânico dos maciços das encostas a jusante, resultantes da alteração motivada pela persistência de altos teores de humidade provocados pelas descargas permanentes ao longo de 15 anos, e à evolução dos critérios de observação e de controlo de segurança de barragens, justificaram o complemento dos sistemas inicialmente instalados.

O complemento do sistema de observação da barragem e fundação tem como objectivo melhorar a qualidade da observação dos deslocamentos verticais no corpo da barragem e no interior do maciço de fundação e, simultaneamente, estender a observação da subpressão instalada no maciço rochoso a um maior volume da fundação. Para a observação dos deslocamentos, pretende-se instalar 5 extensómetros mecânicos de varas ou de barras na fundação, a partir da galeria geral de drenagem da barragem, 3 dos quais servirão também para apoio do nivelamento geométrico de precisão das galerias horizontais da barragem. Para a observação da subpressão, pretende-se instalar 13 novos piezómetros de câmara única. Na Figura 4, representa-se o sistema complementar projectado.

Pretende-se reactivar as observações das obras subterrâneas. O Plano complementar de observação segue, no essencial, o preconizado anteriormente, mas é delineado, no que respeita à instalação de novos aparelhos, em função das limitações impostas pela exploração dos equipamentos electromecânicos instalados, que impossibilitam a execução de furos de sondagem na parte superior da caverna da central, acima do piso do pavimento principal. As observações preconizadas dizem respeito ao controlo dos efeitos estruturais nos suportes instalados nas obras subterrâneas e no maciço rochoso envolvente, por intermédio da medição de deslocamentos relativos entre pontos de hasteais das cavidades, utilizando convergenciómetro de fio de invar, e entre pontos instalados no maciço rochoso, utilizando extensómetros simples e múltiplos de varas. Para a medição de tensões na abóbada da central, reactivaram-se as leituras dos extensómetros tipo Carlson que foram instalados no início das obras. Numa fase posterior, considera-se, ainda, ser de interesse efectuar medições do estado de tensão instalado nas paredes das cavidades, em locais apropriados. Para a observação de deslocamentos, achou-se conveniente estabelecer quatro secções principais de medição, sendo as três primeiras (S_1 , S_2 e S_3) coincidentes com as anteriores secções (Figura 5). A secção S_4 é uma secção secundária de leituras, apenas com medição de convergências. Na Figura 6,

apresenta-se o esquema de medição de deslocamentos previsto para as três secções principais de observação.

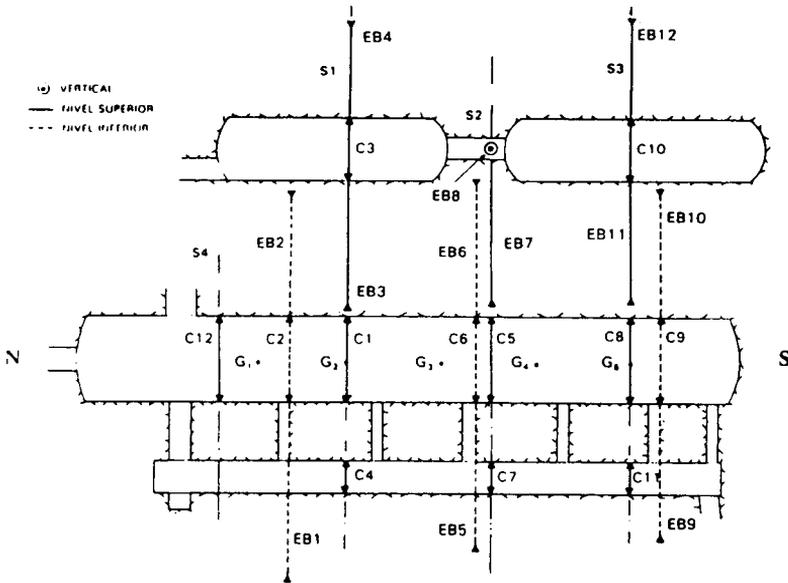


Figura 5 - Localização em planta das secções instrumentadas nas obras subterrâneas

Nas encostas, alguns dos sensores colocados nas ancoragens de controlo, instaladas no maciço envolvente da barragem a jusante, registaram na última década aumentos significativos da tensão instalada. Embora existem dúvidas sobre a fiabilidade dos registos, após cerca de vinte anos de funcionamento em ambiente fortemente agressivo, tal facto conduziu ao estudo cuidadoso do comportamento desse maciço que será apoiado pelo reforço do seu sistema de observação. Acresce que o sistema geodésico de medição dos deslocamentos de pontos superficiais do maciço não tem precisão suficiente para confirmar os resultados obtidos com a medição das tensões nas ancoragens. Assim, definiu-se um sistema complementar de observação destas estruturas geológicas baseado na instalação de 6 conjuntos de extensómetros de varas, 3 na margem direita e 3 na margem esquerda (Figura 7). Foram, também, efectuados furos para inspecção regular com câmara de televisão. O sistema geodésico instalado nas margens do reservatório ao longo do canhão foi abandonado após 1985, tendo até ao momento somente sido registado um deslizamento de massa rochosa com algum significado, antes do primeiro enchimento.

5 - CONCLUSÃO

Um novo sistema de observação para o empreendimento hidroeléctrico de Cahora-Bassa, complementar ao inicialmente estabelecido, está a ser progressivamente implantado.

Foram, entretanto, iniciadas as medições de convergências nas estruturas subterrâneas e descarregadores da barragem, com base num novo convergenciómetro de fio de invar especialmente desenvolvido pelo LNEC de modo a ser possível obter medições com elevada precisão.

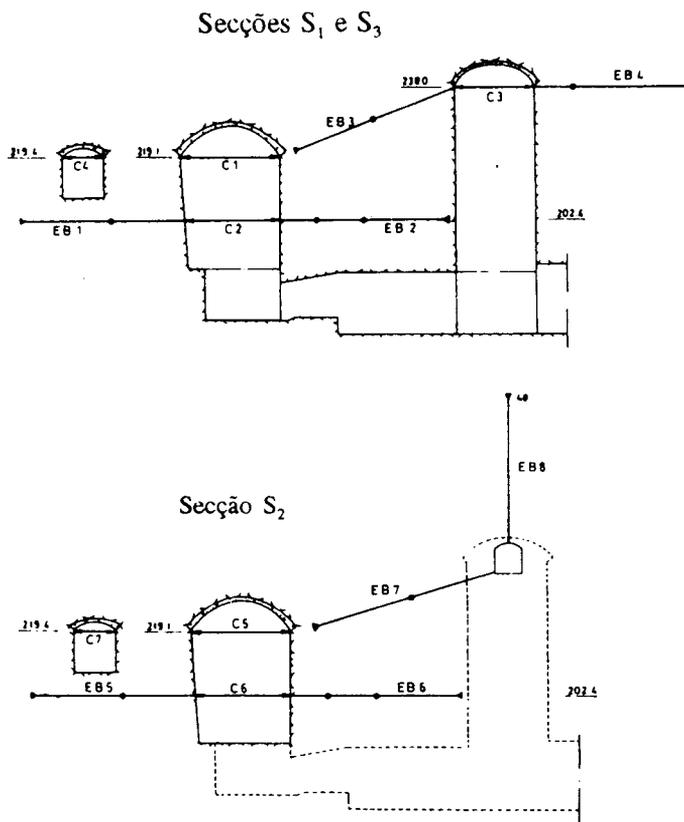


Figura 6 - Secções instrumentadas nas obras subterrâneas

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à HCB - Hidroeléctrica de Cahora-Bassa autorização para a publicação desta comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HP - *O aproveitamento de Cahora-Bassa*. Hidrotécnica Portuguesa, 1^{as} Jornadas de Engenharia de Moçambique, Lourenço Marques, 1965.
- RAMOS, J.M.; BAPTISTA, A.; SILVA, H.S.; CASTRO, A.T. - *Observação da barragem de Cahora-Bassa. Análise do comportamento (1975-1989)*. LNEC, Relatório, Lisboa, 1991.
- SILVA, H.S. - *A utilização de metodologias hidrogeoquímicas na observação do comportamento de fundações de barragens. Aplicação à barragem de Cahora-Bassa*. LNEC, Relatório, Lisboa, 1989.
- SILVEIRA, A.; AZEVEDO, M.; COSTA, P. - *Contribuição para o estudo da central subterrânea de Cahora-Bassa*. LNEC, Memória nº 430, Lisboa, 1974.

SOUSA, L.R.; LAMAS, L.N.; MARTINS, C.S. - *Applications of computational mechanics to underground structures in hydraulic projects*. 1º Workshop Internacional sobre 'Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, Ed. Vargas et al., A.A. Balkema, Roterdão, 1994.

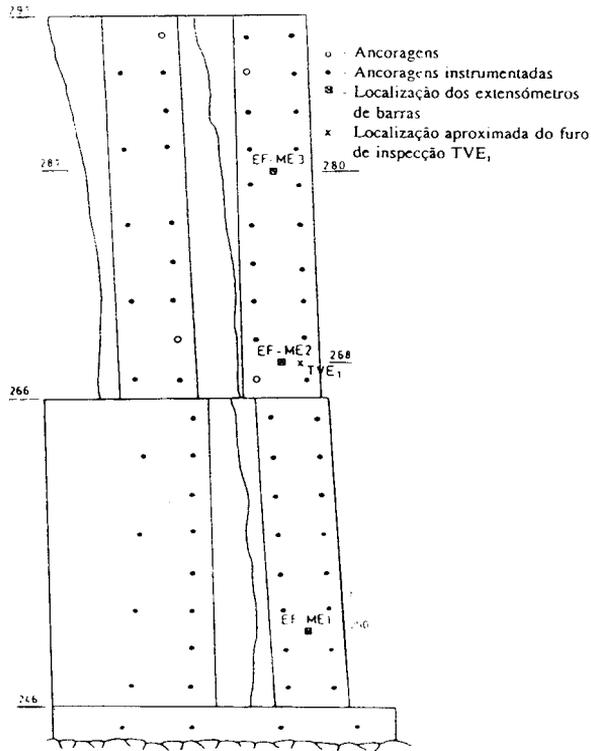


Figura 7 - Encosta da margem esquerda. Localização de um furo para inspecção com câmara TV