

CONTROLO DAS PRESSÕES E CAUDAIS E COMPORTAMENTO OBSERVADO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DA AGUIEIRA*

Uplift, Seepage Control and Observed Behaviour of Aguieira Dam Foundation

por

ABEL TORRES MASCARENHAS**

LUÍS RIBEIRO E SOUSA**

CARLOS SOUZA MARTINS***

RESUMO – Neste trabalho, apresentam-se estudos realizados para a fundação da barragem da Aguieira, localizada em Portugal.

Estes estudos envolveram a previsão das obras de impermeabilização e de drenagem a adoptar na fundação, com base no estudo do escoamento e do estado de tensão para diferentes situações hidráulicas por meio de modelos planos por elementos finitos.

Indicam-se as obras de impermeabilização e de drenagem efectivamente realizadas, tendo como referência os estudos anteriores, e o sistema de observação utilizado para controlo do comportamento hidromecânico da fundação. Apresentam-se, ainda, alguns resultados relevantes do comportamento observado da fundação e os obtidos por um modelo tridimensional por elementos finitos.

SYNOPSIS – In this paper studies concerning the Aguieira dam foundation (Portugal) are presented.

Watertightening and drainage works to be adopted were analysed on basis of a study of seepage and of state of stress in different hydraulic conditions through finite element plane models.

The watertightening and drainage works actually put into effect are briefly described with reference to the preceding studies, as well as the observation system used to control the hydromechanical behaviour of the foundation. Some relevant data of the observed behaviour of the foundation are also presented, and some results obtained with a finite element tridimensional model.

* Comunicação apresentada ao XV Congresso da ICOLD, Lausanne, 1985.

** Engenheiro Civil, Investigador do LNEC.

*** Engenheiro Civil, Bolseiro no LNEC.

I – INTRODUÇÃO

A barragem da Aguieira integra-se num aproveitamento de fins múltiplos, fundamentalmente de produção de energia, de defesa de cheias e de rega, localizado no rio Mondego em Portugal (Fig. 1). A construção da barragem decorreu no período compreendido entre 1974 e 1979, tendo-se iniciado o seu enchimento em 1980 e alcançado, aproximadamente, o nível máximo de exploração em Julho de 1984.

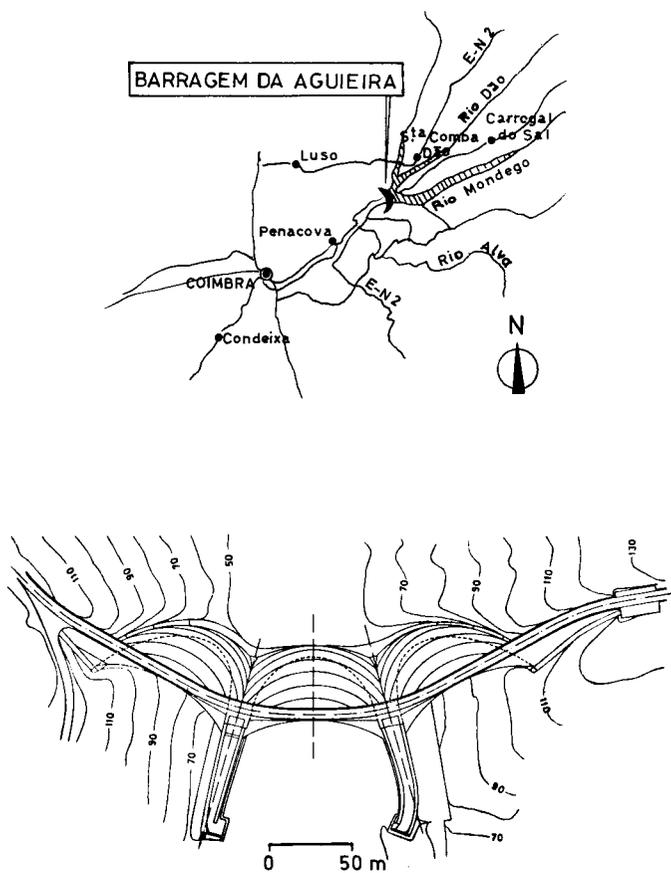


Fig. 1 – Barragem da Aguieira.

A barragem é uma estrutura em abóbadas múltiplas, constituída por três abóbadas de dupla curvatura e por dois contrafortes centrais, onde se situam os descarregadores de cheia. A central fica instalada entre os dois contrafortes, situando-se a sua fundação a mais de 30 m abaixo do leito do rio. Existe, também, um coroamento de gravidade que permite a passagem de uma estrada.

Algumas características principais da obra são as seguintes:

| | |
|--|---------------------|
| altura acima da fundação | 89,0 m |
| espessura mínima da abóbada no perfil do fecho | 4,5 m |
| espessura máxima da abóbada no perfil do fecho | 8,0 m |
| relação corda/altura da abóbada central | 1,2 |
| desenvolvimento do arco do coroamento | 270,0 m |
| volume total do betão | 0,4 Mm ³ |
| capacidade da albufeira | 430 Mm ³ |

Neste trabalho, apresentam-se estudos efectuados para previsão e controlo das acções da água na fundação, resultando destes estudos as ideias de base a adoptar para realização das obras de impermeabilização e de drenagem. Procura, ainda, retratar-se o comportamento hidromecânico da fundação durante o primeiro enchimento, em especial nos últimos patamares do nível de água, incluindo o correspondente, aproximadamente, ao nível máximo de exploração, e analisar, tendo em conta a eficiência das obras de impermeabilização e drenagem efectivamente realizadas, as acções da água presentes. Para este efeito, desenvolveu-se um modelo tridimensional por elementos finitos com a finalidade de prever e interpretar o escoamento existente no maciço rochoso de fundação da barragem.

2 – ESTUDOS PARA PREVISÃO E CONTROLO DAS ACÇÕES DA ÁGUA NA FUNDAÇÃO

O maciço rochoso em que está fundada a barragem é constituído por rochas dos tipos grauaque, filádio e xisto, que se apresentam em camadas alternadas e sucessivas. A compartimentação do maciço foi determinada com base em estudos de prospecção tradicional, complementados por amostragem integral. Detectaram-se várias famílias de descontinuidades, sendo a família associada à xistosidade a que ocorre com mais frequência (Fig. 2). Estão presentes várias falhas, quer na zona dos contrafortes, quer na das abóbadas, ocorrendo nas galerias de prospecção com um afastamento médio de cerca de 8 m. A sua possança é igual ou superior a 10 cm em cerca de 40% do total, podendo a zona de esmagamento atingir espessuras da ordem de 60 cm (Sousa e Mascarenhas, 1983).

A caracterização hidráulica do maciço rochoso foi feita por meio de ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon, a partir dos quais foi possível estabelecer um zonamento simplificado da fundação, em três zonas de permeabilidade decrescente com a profundidade.

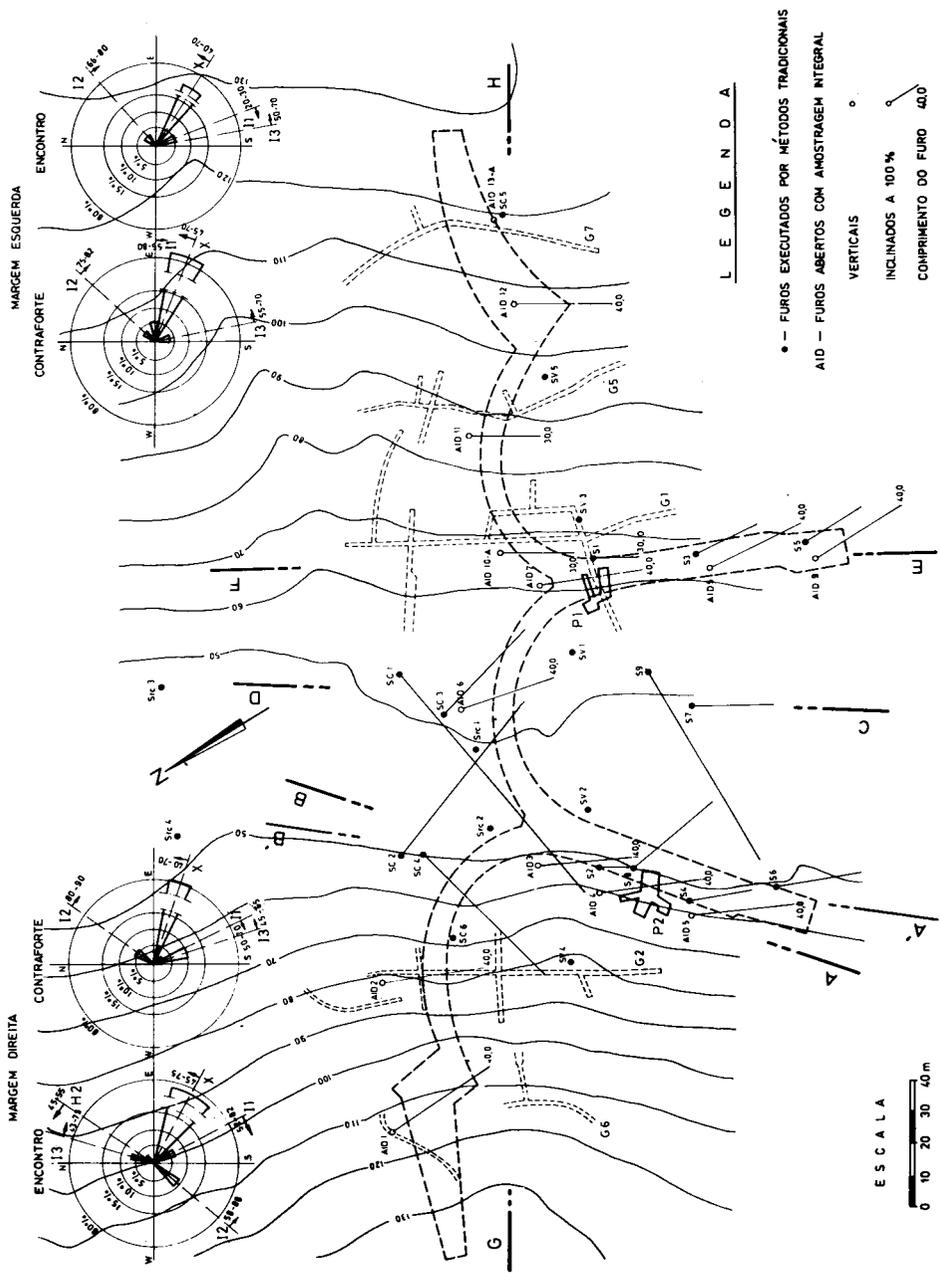


Fig. 2 — Maciço rochoso de fundação. Compartimentação e localização dos furos, poços e galerias de sondagem.

As acções decorrentes da percolação da água, no maciço rochoso da fundação de uma barragem, traduzem-se, fundamentalmente, por forças mássicas na fundação e por subpressões na superfície de inserção das abóbadas e dos contrafortes. As forças mássicas na fundação e as subpressões, se não forem introduzidos dispositivos adequados para a sua minoração, por meio de obras de impermeabilização e de drenagem, podem ter importantes implicações na segurança da obra, em virtude dos elevados gradientes existentes nas abóbadas, dada a altura da barragem e a sua pequena espessura (Mascarenhas, 1979).

A previsão das obras de impermeabilização e drenagem para controlo das acções da água foi feita com base no estudo do escoamento na fundação, para diferentes situações hidráulicas, e na análise do correspondente estado de tensão, utilizando modelos de cálculo planos por elementos finitos.

Assim, considerou-se um modelo global, em que se reproduziram as características hidráulicas do maciço rochoso e diversos dispositivos de impermeabilização e de drenagem. Nestes estudos, houve que ponderar a existência de uma galeria subfluvial e considerou-se uma cortina de impermeabilização e uma ou duas cortinas de drenagem (Fig. 3).

Iniciou-se a análise do escoamento na fundação pela situação de referência de fundação natural, que revelou a existência de elevadas pressões e velocidades de escoamento junto à superfície de inserção da abóbada, pelo que a segunda situação hidráulica estudada envolveu, para além da galeria de fundação, a existência de uma cortina de impermeabilização.

Os resultados obtidos patenteiam uma diminuição significativa das subpressões na base da barragem e das pressões na fundação, se bem que com aumento de velocidades e de caudais afluídos de montante. Daí se procurar estudar uma nova situação, caracterizada em relação à anterior pela introdução de cortinas de drenagem desembocando na galeria de fundação. Verifica-se, então, uma maior diminuição das pressões, ficando o maciço a jusante da drenagem com pressões de valor muito reduzido. Na Fig. 3, indicam-se as equipotenciais para alguns dos modelos considerados, chamando-se a atenção para o facto de terem sido adoptadas condições de eficiência elevada para os vários dispositivos e para a galeria de fundação. Concluiu-se, então, pela adopção de uma cortina de impermeabilização de cerca de 30 m de profundidade, mais a jusante, e de uma cortina superior de drenagem (modelo 9), cujas equipotenciais se apresentam na Fig. 4. Não se considerou uma cortina de drenagem inferior, pois em pouco se reduziam as pressões e, em contrapartida, havia um acréscimo importante nas velocidades de escoamento e nos caudais drenados.

A análise do estado de tensão na fundação foi feita para esta última situação, considerada a mais adequada para o projecto das obras de impermeabilização e de drenagem, tendo presente as forças mássicas determinadas a partir do estudo hidráulico e as forças transmitidas pela barragem à fundação, sendo estas últimas estimadas com

base no cálculo da barragem como casca elasticamente apoiada na fundação. Utilizou-se um modelo por elementos finitos em estado plano de deformação, com malha idêntica ao do correspondente cálculo do escoamento, e supôs-se o estado de tensão inicial do maciço representado por tensões verticais correspondentes ao peso do terreno a à impulsão da água e por tensões horizontais proporcionais às verticais.

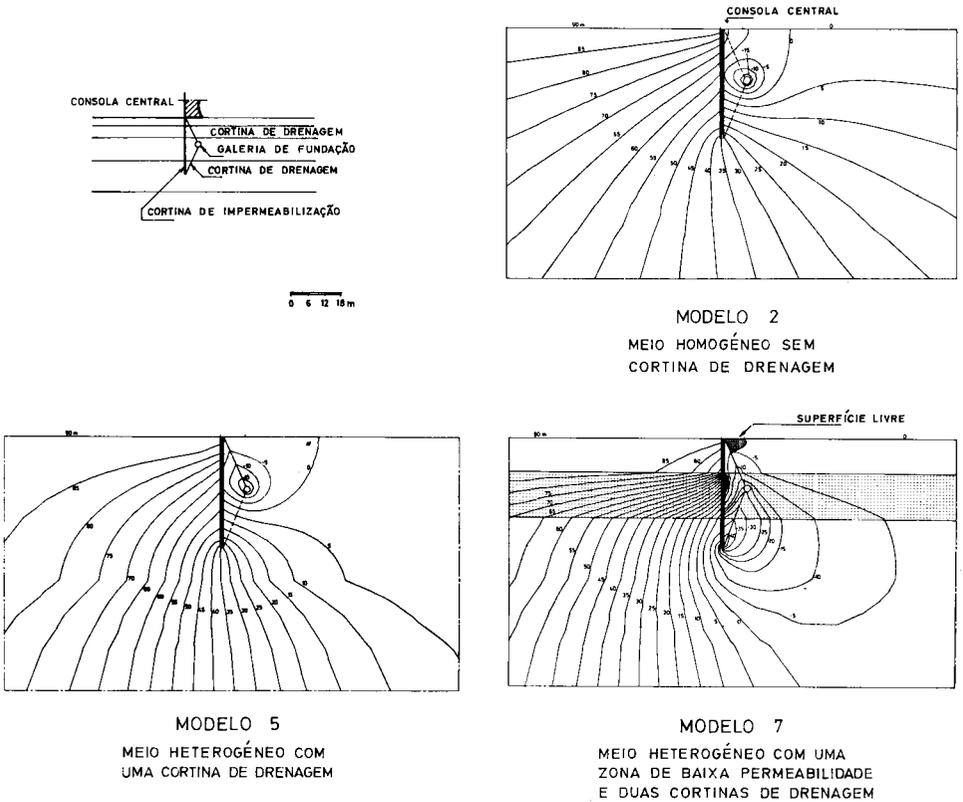


Fig. 3 — Análise do escoamento através da fundação.

Na Fig. 4, para além das equipotenciais, apresenta-se o estado de tensão obtido para uma relação de 0,5 entre tensões horizontais e verticais iniciais. Consta-se a existência de tensões de tracção aproximadamente horizontais a montante da cortina de impermeabilização, que poderão afectar a sua eficiência do ponto de vista hidráulico, e verificam-se as maiores compressões na zona de apoio de jusante da barragem e na vizinhança da galeria de fundação.

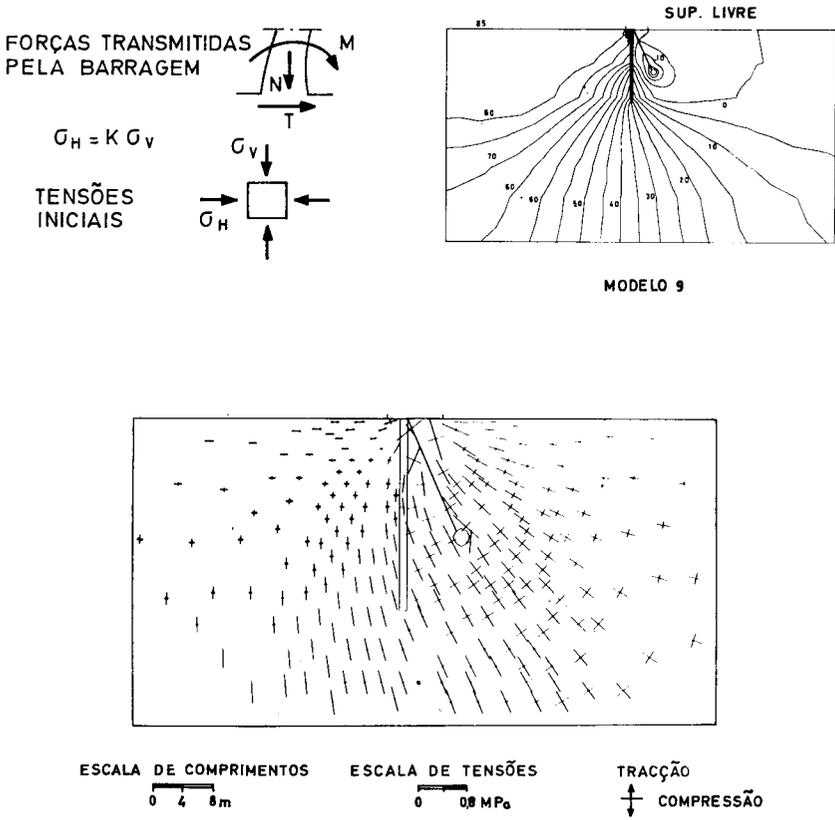


Fig. 4 – Equipotenciais e estado de tensão na fundação para a situação final adoptada.

No âmbito da análise do comportamento da fundação, foi também feito um estudo da estabilidade de um dos contrafortes, considerando como acções as subpressões na base obtidas por intermédio de um modelo de escoamento por elementos finitos, em que se estudou o escoamento num plano horizontal correspondente à superfície de inserção do contraforte e de duas abóbadas, e os esforços transmitidos pelo contraforte à fundação, determinados com base nos resultados do comportamento estrutural da barragem (Sousa e Mascarenhas, 1983).

A Fig. 5 apresenta os esforços normais e tangenciais ao longo do plano médio do contraforte, devidos ao peso próprio e à pressão hidrostática, bem como as subpressões calculadas.

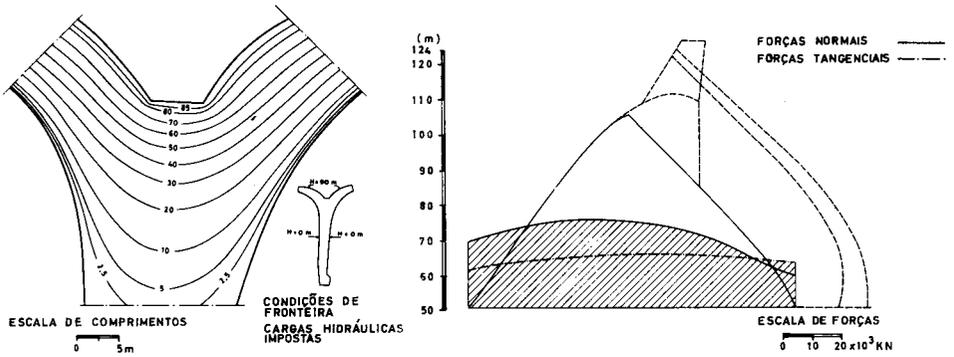


Fig. 5 – *Análise da estabilidade de um contraforte.*

Determinou-se um coeficiente de escorregamento de $T/V = 0,67$, estimando-se numa redução de 4% da componente vertical a influência das subpressões para a situação simplificada adoptada, sem dispositivos de impermeabilização e de drenagem.

3 – OBRAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO E DRENAGEM REALIZADAS

Como consequência dos estudos referidos, foram efectuadas obras de impermeabilização e de drenagem na fundação da barragem, que se indicam em planta na Fig. 6.

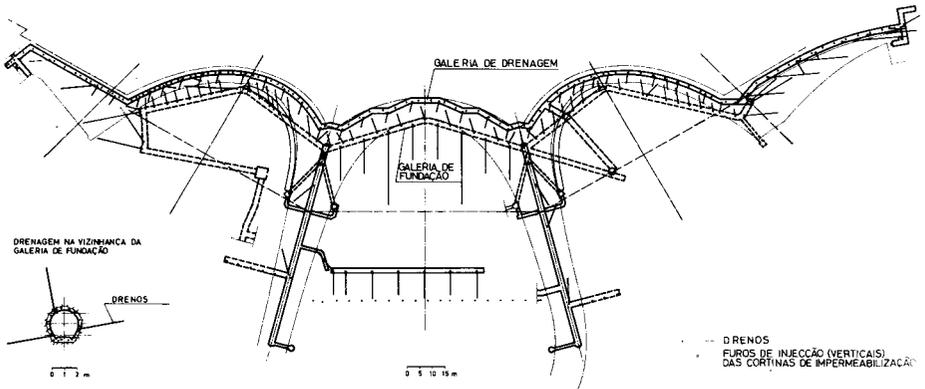


Fig. 6 – *Rede de drenagem e obras de impermeabilização existentes.*

As obras de impermeabilização realizadas na fundação constam fundamentalmente de uma cortina efectuada a partir da galeria geral de drenagem e de uma outra cortina realizada a jusante da central. A cortina de montante é vertical, com profundidades entre cerca de 20 m no fundo do vale e 30 m nas abóbadas laterais, tendo cerca de 20 m nos encontros, e acompanha o desenvolvimento da superfície de inserção da barragem.

A cortina de impermeabilização de jusante é também vertical, com cerca de 20 m de profundidade, e situa-se, na abóbada central, entre os dois contrafortes, prolongando-se de modo a abrangê-los.

As obras de drenagem realizadas na fundação constam essencialmente de uma galeria de fundação, de uma cortina de drenagem realizada por meio de furos, executados a partir da galeria de fundação e da galeria geral de drenagem, e de uma outra cortina de drenagem realizada a jusante, entre os contrafortes. A galeria de fundação, com forma de ferradura, com altura de escavação de cerca de 3 m, apresenta um revestimento contínuo de betão, tendo sido executados perfis de furos de drenagem com cerca de 3,5 m de profundidade, distanciados entre si de 6 m. Estes perfis destinaram-se a assegurar uma certa capacidade drenante da galeria, a qual tinha sido prevista sem revestimento, como se considerou nos cálculos anteriormente referidos. A galeria de fundação acompanha, na zona das abóbadas, a superfície de inserção da barragem, situando-se a profundidade de cerca de 20 m. A cortina de drenagem de montante é fundamentalmente constituída por furos realizados a partir da galeria de fundação, excepto nas zonas dos encontros, em que se processa a partir da galeria geral de drenagem com espaçamento entre furos que, inicialmente, era de cerca de 10 m, o qual posteriormente foi diminuído, em zonas das abóbadas laterais e na ligação aos contrafortes, para cerca de 5 m. Para além destes furos, existem outros, que se encontram assinalados nas Figs. 6 e 7, nomeadamente os perfurados a partir da galeria geral de drenagem, que sequenciam os furos da galeria de fundação e asseguram a drenagem da zona de ligação betão-rocha.

4 – OBSERVAÇÃO E COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO

A barragem e o maciço rochoso de fundação são observados de acordo com o previsto no plano de observação (Florentino et al., 1985). No maciço de fundação, são medidos deslocamentos horizontais e verticais, pressões e caudais drenados (Fig. 7).

Para determinação dos deslocamentos horizontais, existem fios de prumo invertidos próximo do eixo de cada uma das abóbadas, ao longo do perfil dos contrafortes, a montante e a jusante, e nos encontros. Possibilitam a observação de deslocamentos ao nível do soco e da galeria de fundação, com excepção dos fios de prumo de jusante dos contrafortes e do encontro da margem direita, os quais não permitem a obtenção dos deslocamentos ao nível da galeria de fundação.

Os deslocamentos verticais são determinados ao nível do soco, por meio de nivelamento geométrico de precisão de marcas situadas ao longo do soco de jusante das abóbadas e nas galerias dos contrafortes.

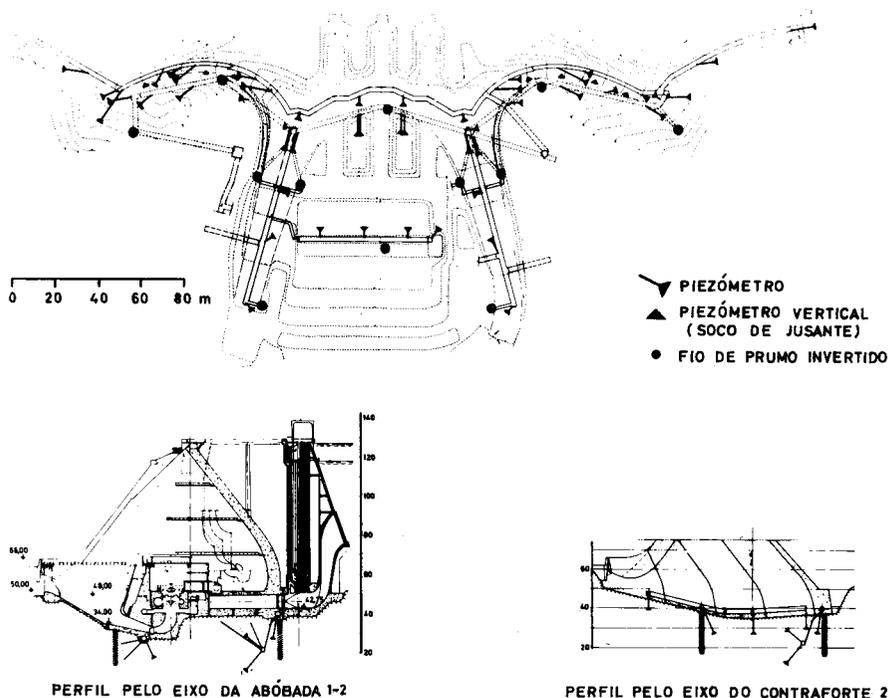


Fig. 7 – Plano de observação da fundação.

As pressões da água no maciço rochoso de fundação são obtidas com base na rede piezométrica existente, referida na Fig. 7, a qual é constituída por piezómetros situados ao longo da galeria geral de drenagem, dirigidos para a fundação, por piezómetros existentes ao longo da galeria de fundação, dirigidos para baixo e para cima desta galeria, e por piezómetros situados ao longo das galerias dos contrafortes. Existem, ainda, piezómetros verticais efectuados a partir do soco de jusante das abóbadas laterais. Na abóbada central, as pressões na fundação, a jusante, são medidas por meio de piezómetros realizados a partir da galeria de jusante situada entre os contrafortes.

Os caudais drenados são medidos, na galeria geral de drenagem, na galeria de fundação, nas galerias dos contrafortes e na galeria situada a jusante da abóbada central, entre os contrafortes, a partir do caudal individual debitado pelos drenos.

O primeiro enchimento da barragem iniciou-se em Maio de 1980 (cota 53,5 m), tendo-se atingido, aproximadamente, a cota 120 m em Junho de 1981 e, de seguida, o nível de água manteve-se entre 115 e 120 m até Abril de 1983, mês em que se atingiu a cota 124,4 m. Este nível foi ultrapassado, em Julho de 84, tendo nesta data o valor de 124,8 m, praticamente o nível máximo de exploração.

Na Fig. 8, apresentam-se resultados da observação do comportamento da fundação, envolvendo os aspectos hidráulico e mecânico, em que se salientam três épocas representativas da evolução do nível de água nos últimos patamares. Para a época correspondente ao nível 118,5 m (Maio de 1981), foram já apresentados e analisados alguns resultados da observação na publicação de Sousa e Mascarenhas (1983). Verifica-se que, para o nível máximo atingido, as alturas piezométricas têm o seu valor máximo nas abóbadas laterais, na parte baixa das vertentes, sendo o valor máximo da percentagem de carga, nos piezómetros situados na cortina de drenagem, de cerca de 45%. Os piezómetros situados no soco de jusante das abóbadas laterais apresentam, os da abóbada direita, alturas piezométricas quase sempre acima da cota do soco, enquanto que os da abóbada esquerda apresentam alturas piezométricas inferiores à cota do respectivo soco. Constatase, ainda, que as alturas piezométricas, obtidas com base nos piezómetros situados na galeria de fundação, são inferiores à cota da galeria geral de drenagem. Nos contrafortes, os valores da pressão diminuem rapidamente a partir da cortina de drenagem de montante, apresentando ao nível da drenagem o valor máximo de cerca de 0,15 MPa. A análise da evolução das pressões e dos caudais permite concluir a forte influência da variação do estado de tensão na fundação, para os últimos metros de subida do nível da água, que se traduz, nomeadamente, na elevação da percentagem de carga nos piezómetros situados nas abóbadas laterais ao nível da galeria geral de drenagem e do soco e, em especial, na abóbada direita. Este facto decorre do aumento da permeabilidade da cortina de impermeabilização numa zona adjacente à base da barragem, diminuindo por consequência a sua eficiência.

Tendo em vista uma simulação adequada do escoamento na fundação, incluindo as obras de impermeabilização e de drenagem que foram efectivamente realizadas, desenvolveu-se um modelo de cálculo tridimensional por elementos finitos, que considerou, por simplificação, um plano de simetria passando pela consola central da abóbada central e abrangendo um domínio de maciço, contendo as superfícies de inserção da abóbada lateral e do contraforte da margem direita. Trata-se de um modelo tridimensional que permite a análise de percolação da água em maciços rochosos, quer em meio contínuo, quer em meio descontínuo, utilizando elementos superficiais de junta, e para a hipótese de regime permanente e laminar. Permite a ocorrência de superfícies livres de escoamento, adoptando uma sequência de cálculo não linear com recurso a aceleradores de convergência, seguindo uma técnica de malha de elementos finitos fixa (Martins, 1984).

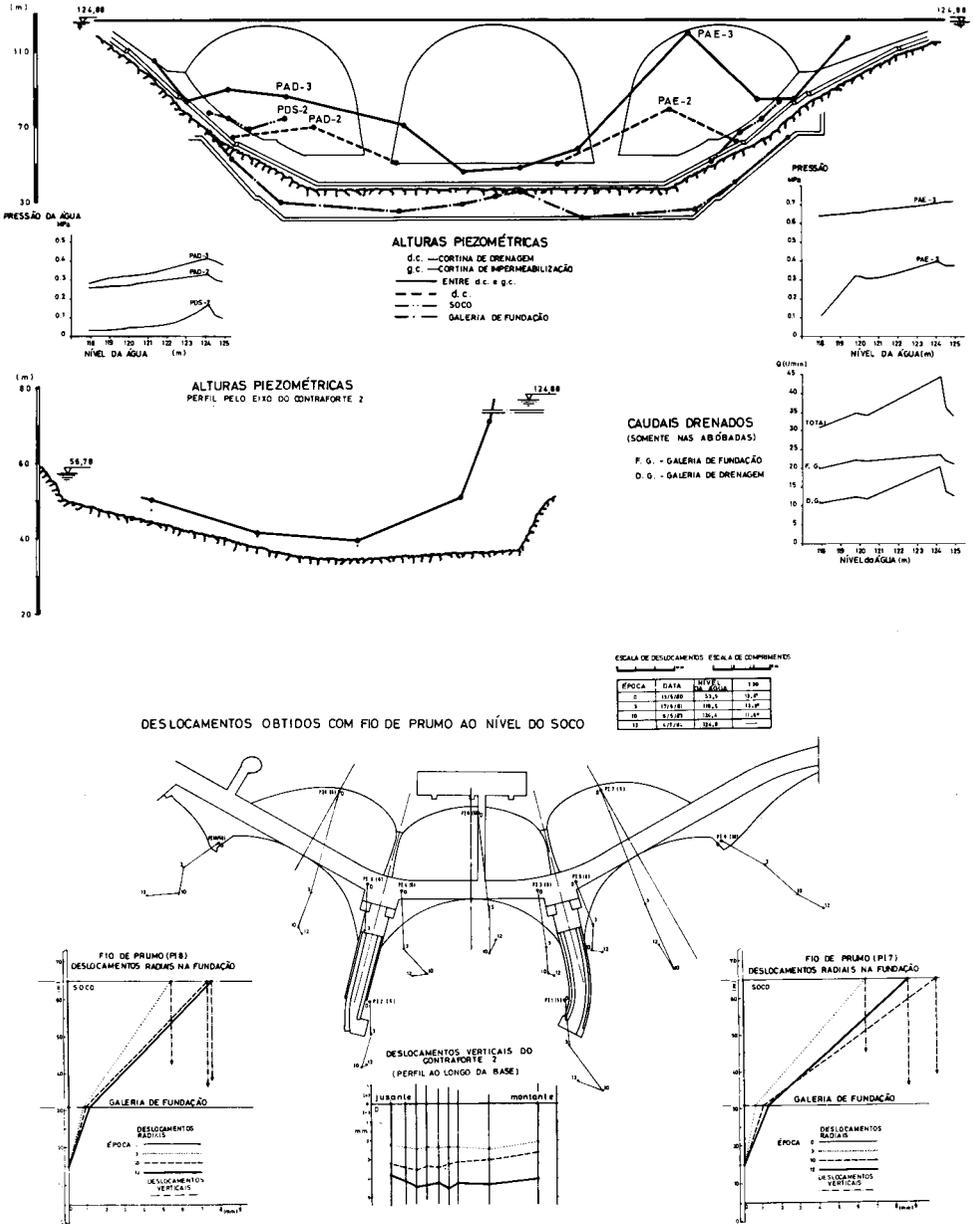


Fig. 8 – Comportamento hidromecânico observado.

Na Fig. 9, apresentam-se características geométricas e hidráulicas e condições de fronteira do problema em análise e uma perspectiva da malha de elementos finitos utilizada (7000 pontos nodais e 6720 elementos finitos). Ilustram-se, também, alguns resultados referentes a equipotenciais através de várias secções, uma pelo fundo do rio, outra pelo contraforte, e ainda na abóbada lateral direita e na encosta a jusante das abóbadas.

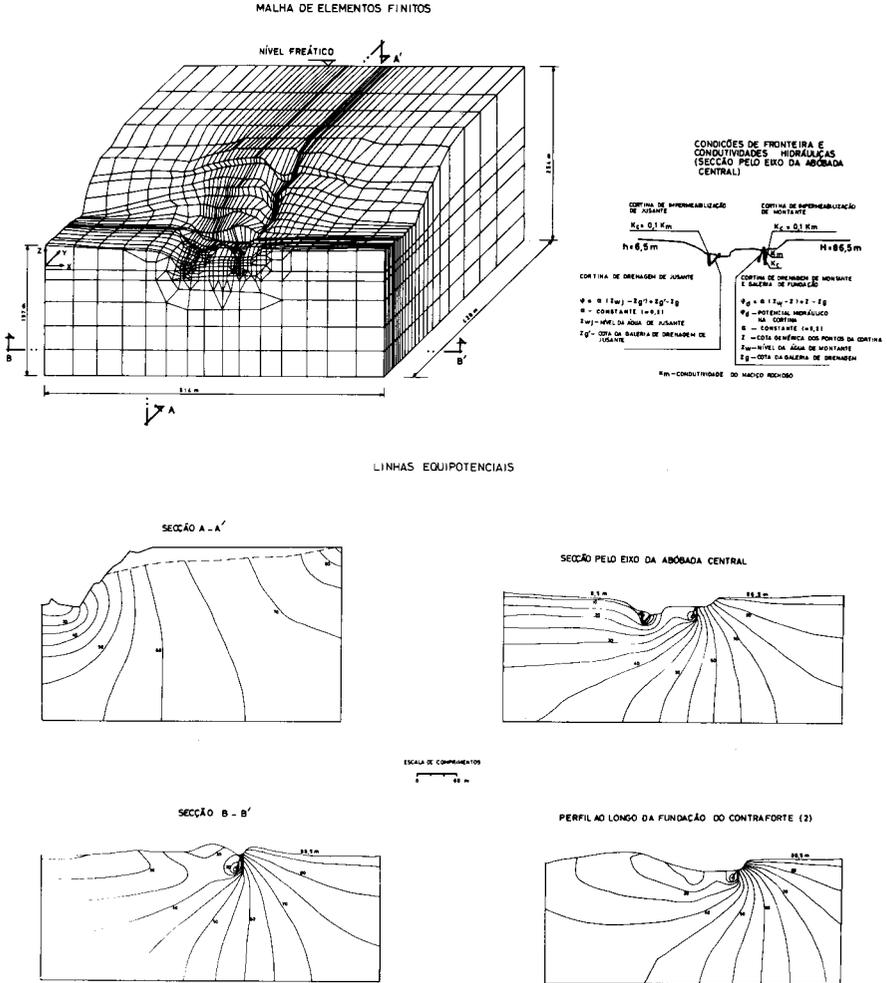


Fig. 9 – Análise do escoamento por meio de um modelo tridimensional por elementos finitos.

5 – CONCLUSÕES

Em estudos efectuados na fase de projecto, foram seleccionadas determinadas obras de impermeabilização e de drenagem, tendo como elemento fundamental de drenagem uma galeria de fundação não revestida. Nas hipóteses admitidas, o potencial hidráulico existente a jusante da drenagem era sempre de um modo geral inferior ao potencial correspondente às cotas de jusante. No entanto, as condições de eficiência da drenagem, que foi efectivamente realizada, são diferentes das previstas inicialmente, nomeadamente devido ao facto da galeria de fundação ter sido revestida.

O comportamento hidromecânico, observado para os últimos patamares do nível da água, traduz uma forte influência do estado de tensão na fundação sobre o escoamento nela existente, a qual se reflecte na diminuição da eficiência das obras de impermeabilização e de drenagem, verificando-se, embora em zonas localizadas, na parte baixa das abóbadas laterais, potenciais hidráulicos ao nível da drenagem relativamente elevados. Com vista à interpretação de resultados da observação, construiu-se um modelo tridimensional por elementos finitos para análise do escoamento na fundação que permitisse, por um lado, a definição de um escoamento de referência em relação ao qual se faria a interpretação do comportamento hidráulico observado, para a máxima carga e em regime normal de exploração, tendo em vista o controlo da segurança da obra e, por outro, a possibilidade de simulação de comportamentos anómalos susceptíveis de se manifestarem durante a exploração da obra, com vista à sua interpretação e procura de soluções a adoptar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Electricidade de Portugal (EDP) a possibilidade de publicar alguns destes resultados. Agradecem, também, a colaboração do sr. J. Pereira na preparação deste trabalho e execução de cálculos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FLORENTINO, C.; MATOS, C.; SILVA, F.; ROCHA, M. (1985) – *Basic principles of dams observation in Portugal. The Aguieira dam example*. XV Congresso Internacional das Grandes Barragens, Lausanne.
- MARTINS, S. (1984) – *Modelo tridimensional para análise de escoamentos em obras subterrâneas*. LNEC, Relatório Interno, Lisboa.
- MASCARENHAS, A. (1979) – *Percolação na fundação de barragens de betão*. LNEC, Tese para especialista, Lisboa.
- SOUSA, L.; MASCARENHAS, A. (1983) – *Analysis and observation of the behaviour of the Aguieira dam foundation*. Int. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich.