

CONTRIBUIÇÃO DA OBSERVAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS DE ATERRO*

The Role of the Instrumentation on the Design of Embankment Dams

por

P. S. SECO E PINTO**

RESUMO – Salienta-se nesta publicação a contribuição da observação no dimensionamento de barragens de aterro. Através de uma rede de correlações estabelecida entre os modelos de cálculo, o conhecimento reológico dos materiais e a observação procura-se localizar as potenciais zonas de fissuração numa barragem de aterro. Efectua-se um estudo paramétrico da influência do teor em água do núcleo, sua espessura e posicionamento, na eventual ocorrência da fracturação hidráulica no núcleo da barragem do Alvito.

SYNOPSIS – The role of the instrumentation on the design of earth and rockfill dams is stressed. The values predicted by numerical models, the behaviour of the material and the field measurements are correlated to evaluate the potential cracking zones in embankment dams.

For the purpose of determining under what conditions hydraulic fracturing would occur a parametric study of Alvito dam is performed, varying the water content of the core, the thickness of the core, and its position.

* Este trabalho foi apresentado pelo autor nas 1.^{as} Jornadas de Engenharia e Ciências Naturais realizadas em Maputo (Moçambique) em Maio de 1984.

** Investigador Auxiliar do LNEC. Docente Convidado da UNL.

1 – INTRODUÇÃO

Foi em 1930 que o Bureau of Reclamation iniciou a prática de instrumentar as barragens de aterro, mas foi só a partir de 1960 que a consciência do papel desempenhado pela observação no controlo de segurança de barragens de aterro ganhou outra dimensão.

Salientam-se as seguintes vantagens que advêm da observação de barragens de aterro:

- a) Testar o comportamento durante a construção e a validade dos critérios utilizados no projecto.
- b) Garantir a segurança da estrutura durante a sua vida útil.
- c) Acumular de experiência com repercussões no estabelecimento de novos critérios de dimensionamento contribuindo assim para a segurança e economia das barragens a projectar e construir no futuro.

2 – EXEMPLOS APRESENTADOS

Procurando o presente trabalho contribuir para uma melhor introspecção da problemática da observação afigura-se oportuno e com interesse a apresentação de dois “casos de obras”.

2.1 – A rotura da barragem de Teton

A barragem de Teton foi construída em 1976, em Idaho (U.S.A.), e tinha aproximadamente 90 m de altura. Apresenta-se na Fig. 1 o perfil tipo da barragem. O maciço de fundação era de natureza vulcânica, muito permeável e exibia fissuras de moderada a elevada intensidade. No sentido de controlar as percolações ao longo da fundação, decidiu-se pela construção de uma cortina de injeções. No entanto, as injeções-piloto evidenciaram as dificuldades que iriam advir na construção da cortina.

Após o primeiro enchimento ocorreu surpreendentemente a rotura da barragem em 5 de Junho de 1976.

Da investigação conduzida pelo INDEPENDENT PANEL [1] infere-se que a causa fundamental da rotura foi o projecto não ter incluído medidas de excepção que contemplassem as características intrínsecas da fundação. O facto de se ter admitido que a cortina de injeções controlava todos os eventuais fenómenos adversos ligados à percolação na fundação, bem como a configuração geométrica do corta-águas favorecer um alívio de tensões no núcleo exibindo os solos deste órgão elevada fragilidade constituíram circunstâncias que jogaram em bloco em detrimento da segurança.

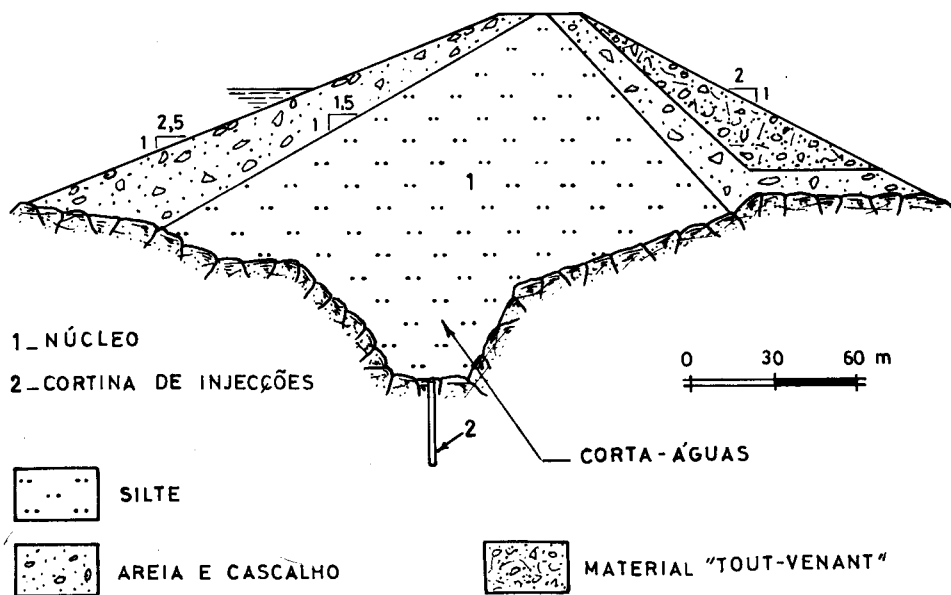


Fig. 1 – Perfil-tipo da barragem de Teton.

Um aspecto importante a salientar é que o Bureau of Reclamation, contrariando a sua prática, não dotou a barragem de dispositivos de observação, o que motivou um total desconhecimento das percolações induzidas no aterro e do estado de tensão instalado na barragem, não havendo assim condições de testar as hipóteses do projecto. Como consequência todo o processo de erosão interna que se desenvolveu no interior do maciço poderia talvez ter sido oportunamente detectado, possibilitando a tomada atempada de medidas recuperativas.

2.2 – O Comportamento anormal da Barragem de Balderhead

A barragem de Balderhead foi construída na Inglaterra em 1965 [2]. Trata-se de uma barragem zonada com um núcleo de material argilo-arenoso e maciços estabilizadores xistosos (Fig. 2).

3 – CONTRIBUIÇÃO DA OBSERVAÇÃO PARA O ESTABELECIMENTO DE NOVOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

3.1 – *Introdução*

As estatísticas apresentadas pela ICOLD [4] revelam que a fissuração ocupa posição de destaque na listagem das deteriorações exibidas pelas barragens de aterro, atingindo cerca de 30% dos casos. A fissuração tem conduzido em alguns casos (e o exemplo da barragem de Teton é bem elucidativo) a roturas catastróficas por acção da pressão de água nas fissuras traduzidas em danos humanos e materiais difíceis de quantificar.

O conhecimento da localização das fendas, bem como da sua propagação durante a vida da obra, torna-se amplamente desejável. A interpretação dos valores dos dispositivos de observação tem possibilitado uma melhor compreensão do processo de fissuração. Neste contexto as observações visuais revelam-se úteis na localização de fendas superficiais, enquanto a detecção das fendas interiores pode ser realizada através da medição dos caudais de percolação. Também a observação, através da leitura das tensões neutras instaladas, do controlo dos assentamentos e do conhecimento da transferência de tensões, motivada pelo contraste de deformabilidade entre o núcleo e os maciços estabilizadores, pode permitir uma avaliação qualitativa da susceptibilidade de fissuração de barragens de aterro zonadas [5].

Enquanto antigamente no dimensionamento das barragens de aterro se procurava assegurar um factor de segurança adequado para as diferentes situações: fase construtiva, pleno armazenamento, esvaziamento brusco e efeitos sísmicos, sente-se presentemente, perante o panorama anteriormente esboçado, a necessidade de complementar esta informação com uma previsão do comportamento da barragem relativamente à fissuração. Neste contexto mostra-se em seguida como, através de uma rede de correlações estabelecida entre os modelos de cálculo, o conhecimento reológico dos materiais e a observação, é possível efectuar a localização das potenciais zonas de fissuração numa barragem de aterro. Como exemplo de aplicação apresenta-se a barragem do Alvito.

3.2 – *Modelo de cálculo*

O programa de cálculo automático desenvolvido baseia-se no método dos elementos finitos e permite através de uma análise incremental em regime elástico não-linear, em estado plano de deformação, simular a fase construtiva do aterro e o enchimento da albufeira, incorporando nesta última os efeitos da impulsão, percolação e colapso do material. Uma descrição pormenorizada do programa pode ser encontrada em [6].

3.3 – Caracterização dos materiais

A barragem de Alvito tem aproximadamente 50 m de altura, 1500 m de comprimento e um volume de aterros de $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. A fundação é constituída de micaxistos e anfibolitos e exibe apreciável rigidez. A Fig. 3 retrata o perfil tipo constituído de um núcleo de material argiloso proveniente de alteração de xistos, maciços laterais estabilizadores de materiais xistosos e um filtro chaminé entre o paramento de jusante do núcleo e o maciço estabilizador.

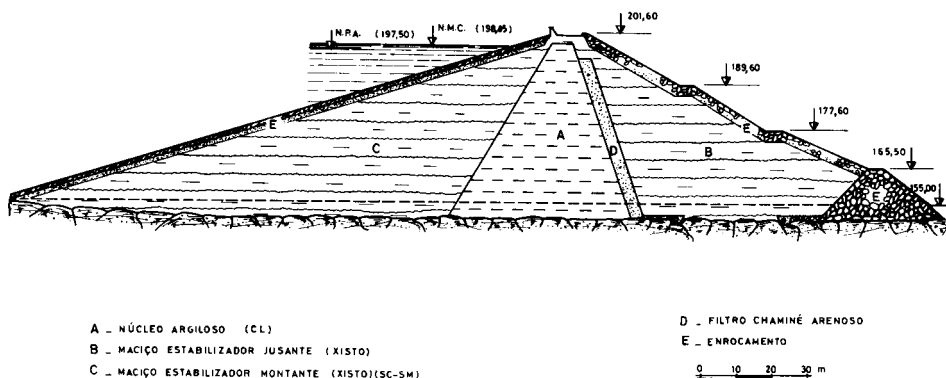


Fig. 3 – Perfil-tipo da barragem do Alvito.

No Quadro 1 estão condensados os parâmetros do modelo hiperbólico dos materiais argilosos e xistosos e da areia obtidos de ensaios laboratoriais especialmente programados.

**QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E PARÂMETROS
DO MODELO HIPERBÓLICO**

Parâmetros	Material argiloso		Material xistoso		Material do filtro
	Lado seco	Lado húmido	Lado seco	Lado seco c/molhagem	
γ_t	20,0	20,7	19,9	19,8	18,4
c	86,0	72,0	66,0	45,0	0,0
\varnothing	17,0	12,0	25,7	24,5	38,0
R_f	0,81	0,69	0,71	0,79	0,76
K	240,0	135,0	290,0	330,0	520,0
K_{ur}	480,0	270,0	580,0	660,0	1040,0
n	0,34	0,46	0,57	0,32	0,37
G	0,315	0,34	0,30	0,31	0,30
F	0,19	0,043	0,17	0,21	0,08
d	6,0	5,0	6,5	8,0	2,5
σ_{3t}	—	—	—	0	—
β	—	—	—	0	—
σ_t	10	15	0	0	0

γ_t – peso volumico total (kN/m³)
c – coesão (kPa)
 \varnothing – ângulo de atrito (graus)
 R_f – coeficiente na rotura
K – módulo K
 K_{ur} – módulo de descarga e recarga
n – módulo expoente

G – parâmetro do coeficiente de Poisson
F – parâmetro do coeficiente de Poisson
d – parâmetro do coeficiente de Poisson
 σ_{3t} – tensão limiar
 β – coeficiente de colapso isotrópico
 σ_t – resistência à tracção (kPa)

3.4 – Estudo paramétrico efectuado

3.4.1 – Generalidades

Tendo como pano de fundo a barragem do Alvito faz-se em seguida um estudo paramétrico da influência das características dos materiais e da geometria do núcleo (designa-se de barragem “Balder” para o núcleo estreito e de barragem “Orov”, para o núcleo inclinado para montante) visando uma melhor compreensão dos mecanismos interactivos da fissuração de barragens de aterro, com particular incidência na fracturação hidráulica.

A fase construtiva foi analisada considerando-se a fundação como rígida e a história de construção de aterro foi simulada admitindo-se 10 camadas horizontais.

O enchimento da albufeira foi simulado em três etapas procurando-se sobrepor o seu efeito ao estado de tensão instalado no maciço no final da construção.

Tendo em conta o contraste de permeabilidades entre o maciço estabilizador de montante e o núcleo considerou-se a pressão de água induzida pelo enchimento da albufeira como uma força de superfície aplicada na face de montante do núcleo, supondo este impermeável (hipótese válida para o enchimento rápido da albufeira). As características tensões-deformações dos maciços estabilizadores foram consideradas em tensões efectivas e as do núcleo em tensões totais.

Analisa-se o equilíbrio das tensões na interface núcleo-macício estabilizador de montante, por se tratar de uma zona propícia para o início da fracturação hidráulica.

3.4.2 – Perfil-tipo da barragem do Alvito

Apresenta-se na Fig. 4 a discretização da secção transversal máxima da barragem do Alvito com 190 elementos subparamétricos e 209 pontos nodais.

No cálculo efectuado considerou-se para os maciços estabilizadores de natureza xistosa e para o núcleo de material argiloso um teor em água, em termos médios, de 1% abaixo do óptimo do ensaio de Proctor normal.

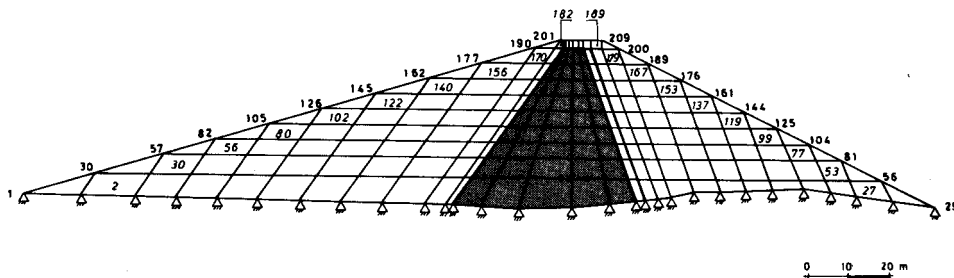


Fig. 4 – Discretização em elementos finitos da secção transversal máxima da barragem do Alvito

A Fig. 5 ilustra a distribuição das tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem do Alvito.

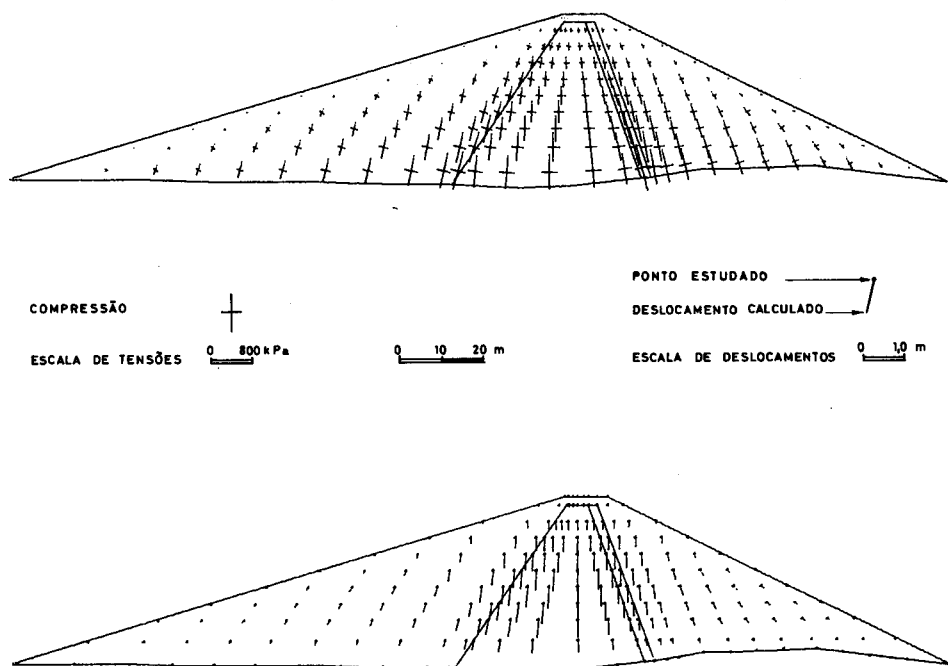


Fig. 5 — Tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem do Alvito

A Fig. 6 mostra a distribuição das tensões principais no final do enchimento da albufeira. Os deslocamentos dos pontos nodais resultam da sobreposição dos valores calculados no final da construção com os valores induzidos pelo enchimento.

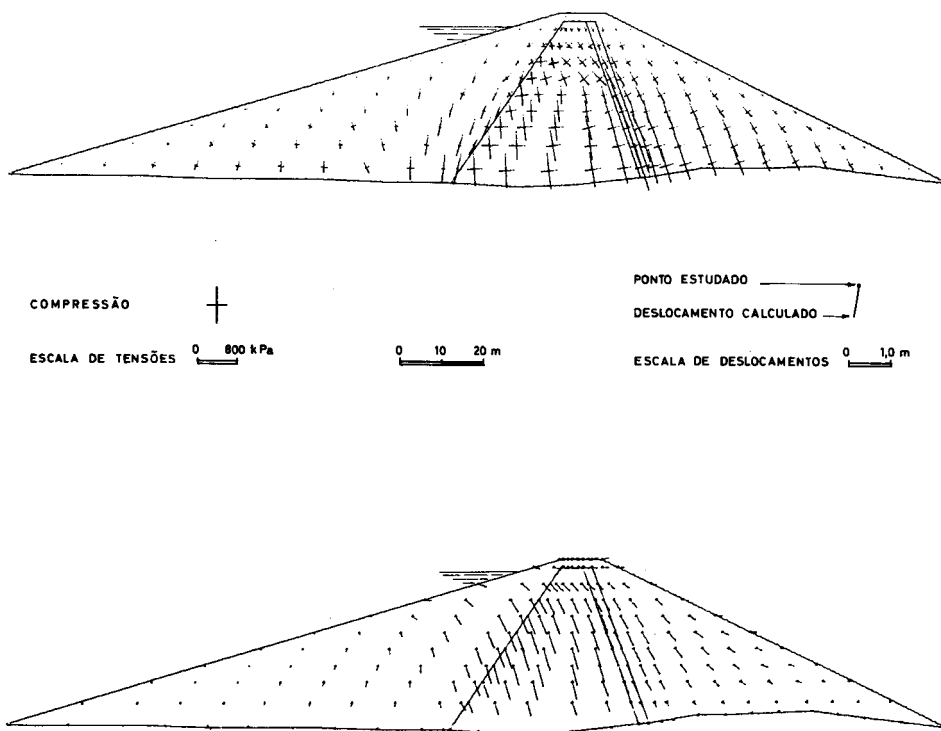


Fig. 6 – Tensões principais e deslocamentos no final do enchimento da barragem do Alvito.

Na Fig. 7 analisam-se comparativamente as tensões principais totais dos elementos da face de montante do núcleo com os valores da pressão de água correspondente ao nível de água da albufeira. Observa-se que as tensões principais σ_1 e σ_3 são superiores aos valores de $\gamma_w h$ o que permite concluir que não haverá fracturação hidráulica nos planos normais a estas tensões, podendo no entanto ocorrer no plano normal à tensão σ_y (perpendicular ao plano em estudo) o aparecimento de fendas transversais.

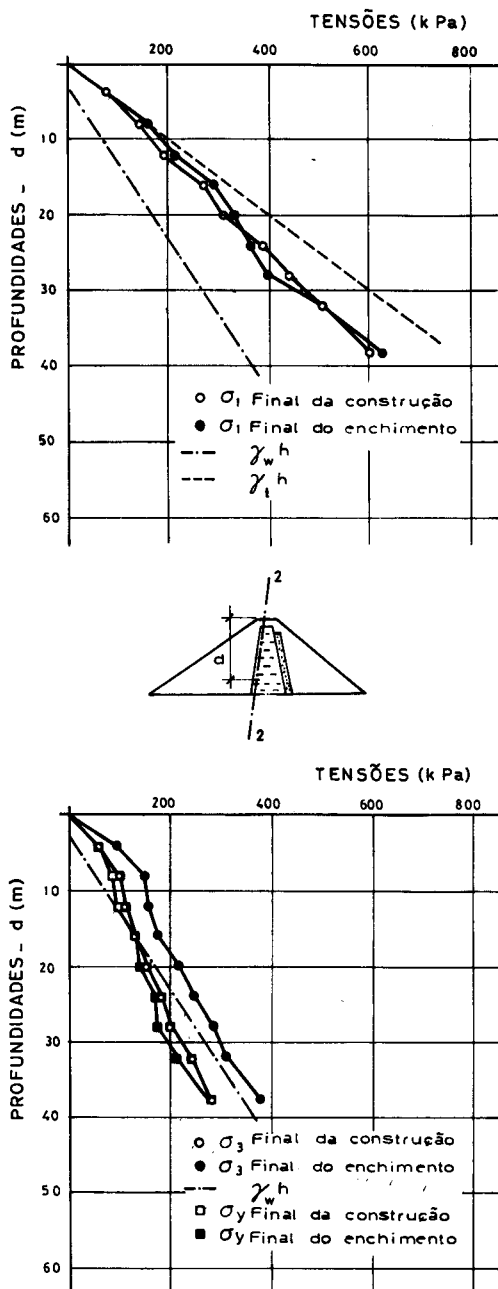


Fig. 7 — Evolução das tensões principais com a profundidade na secção 2-2 da barragem do Alvito

3.4.3 – Núcleo estreito e rígido

A Fig. 8 ilustra a discretização da secção transversal máxima da barragem “Balder” com 188 elementos subparamétricos e 205 pontos nodais.

Neste cálculo considerou-se para os maciços estabilizadores de material xistoso e para o núcleo argiloso um teor em água aproximadamente 1% abaixo do óptimo do ensaio de Proctor normal.

A Fig. 9 retrata a distribuição das tensões principais e dos deslocamentos dos pontos nodais no final da construção.

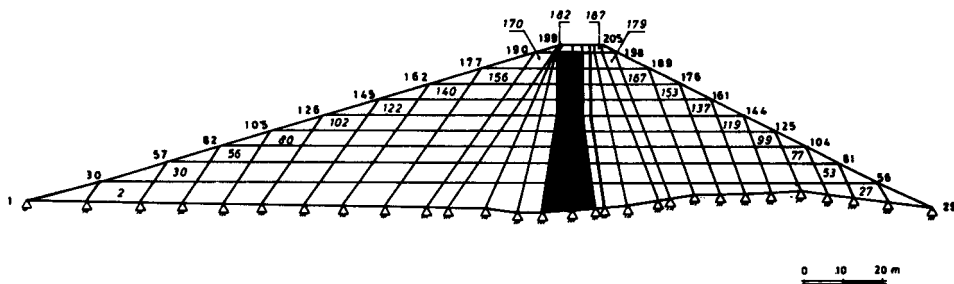


Fig. 8 – Discretização em elementos finitos da secção transversal máxima da barragem “Balder”

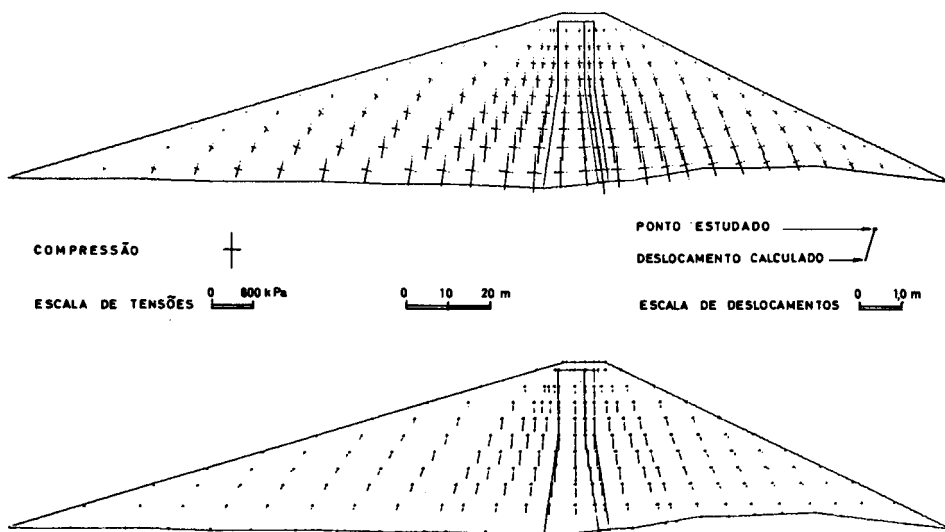


Fig. 9 – Tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem “Balder” (núcleo lado seco)

A Fig. 10 ilustra a distribuição das tensões principais no final do enchimento da albufeira. Os valores dos deslocamentos dos pontos nodais resultam da sobreposição das grandezas calculadas no final da construção com os valores induzidos pelo enchimento.

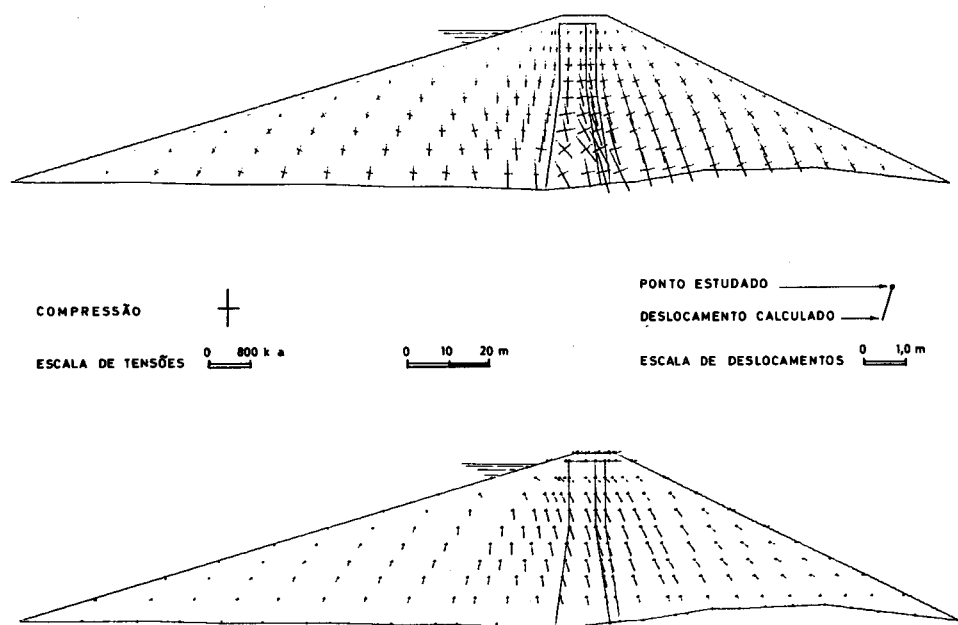


Fig. 10 – Tensões principais e deslocamentos no final do enchimento da barragem “Balder” (núcleo lado seco)

Analisam-se comparativamente na Fig. 11 os valores das tensões totais principais dos elementos da face de montante do núcleo e da pressão de água correspondente ao nível de água da albufeira. Em virtude de as tensões σ_1 e σ_3 serem superiores aos valores de $\gamma_w h$ será pouco provável o aparecimento da fracturação hidráulica nos planos normais a estas tensões, podendo no entanto ocorrer fendas transversais no plano normal à tensão σ_y .

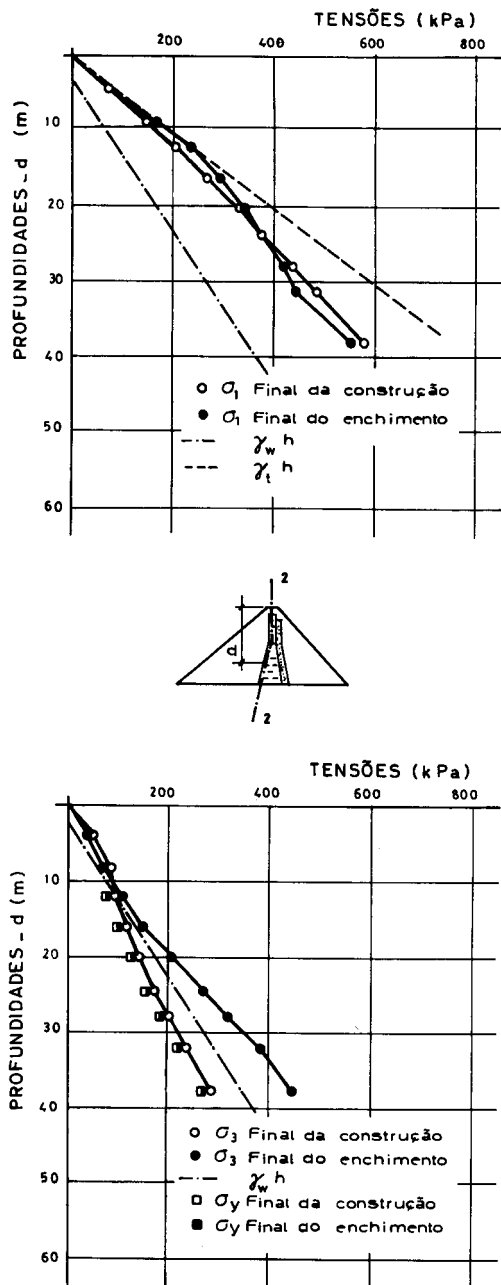


Fig. 11 – Evolução das tensões principais com a profundidade na secção 2-2 da barragem "Balder" (núcleo lado seco)

Os resultados obtidos põem em evidência o efeito desfavorável de um núcleo estreito na distribuição das tensões e que seria de esperar mais intenso no caso de ocorrer um maior contraste de deformabilidade entre os materiais.

3.4.4 – Núcleo estreito e flexível

Nesta análise considerou-se para os maciços estabilizadores um teor em água aproximadamente 1% abaixo do ótimo e para o núcleo um teor em água cerca de 1,5% acima do ótimo do ensaio de Proctor normal.

A Fig. 12 mostra a distribuição das tensões principais e dos deslocamentos dos pontos nodais no final da construção.

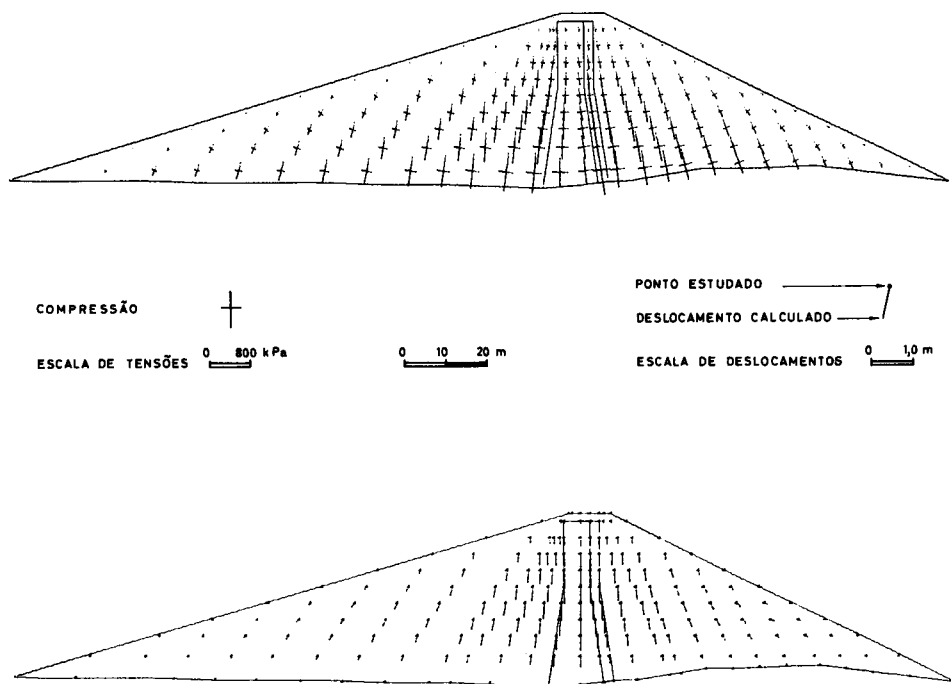


Fig. 12 – Tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem “Balder” (núcleo lado húmido)

A Fig. 13 retrata o panorama das tensões principais no final do enchimento. Os valores dos deslocamentos dos pontos nodais resultam da sobreposição das grandezas calculadas no final da construção com os valores induzidos pelo enchimento.

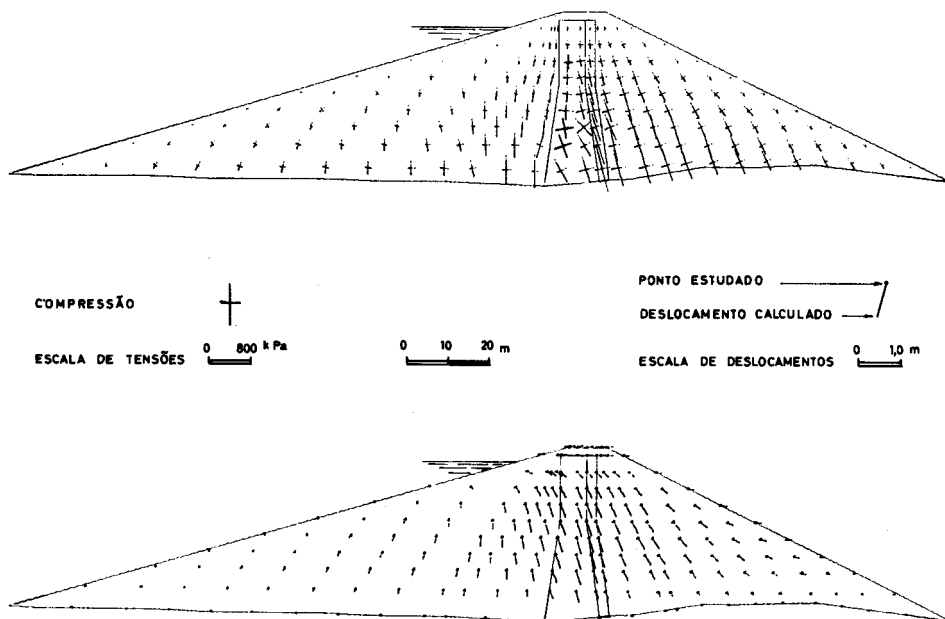


Fig. 13 – Tensões principais e deslocamento no final do enchimento da barragem “Balder” (núcleo lado húmido)

A Fig. 14 compara os valores das tensões totais principais dos elementos da face de montante do núcleo com a pressão de água correspondente ao nível de água da albufeira. Em virtude de as tensões σ_1 , σ_3 e σ_y apresentarem valores superiores a $\gamma_w h$ a possibilidade de fracturação hidráulica será escassa.

Os resultados obtidos salientam as vantagens da colocação do material do núcleo do lado húmido, diluindo um pouco os inconvenientes inerentes à sua pequena espessura.

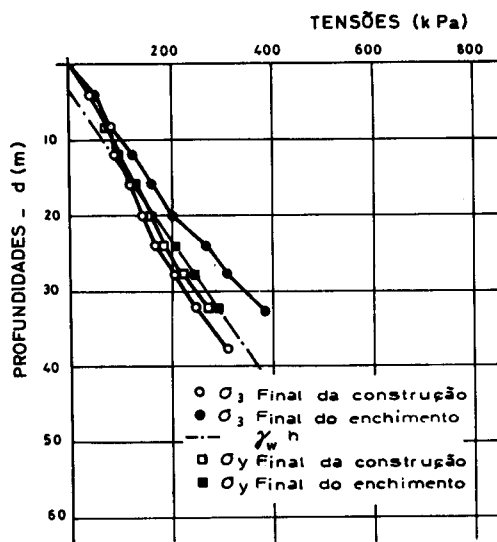
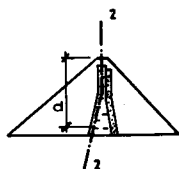
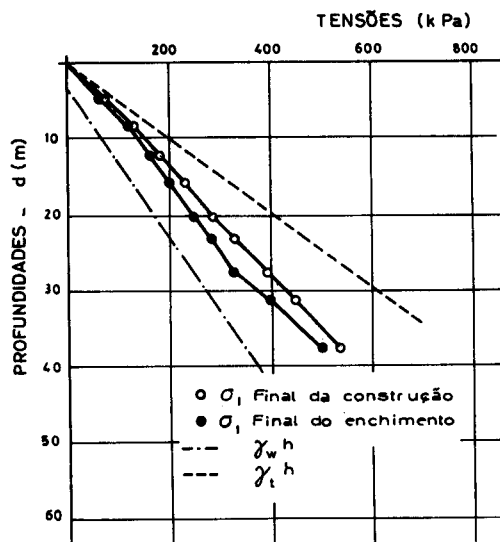


Fig. 14 – Evolução das tensões principais com a profundidade na secção 2-2 da barragem "Balder" (núcleo lado húmido)

3.4.5 – Núcleo inclinado para montante e rígido

A Fig. 15 apresenta a discretização da secção transversal máxima da barragem “Orov” com 188 elementos quadrangulares subparamétricos e 204 pontos nodais.

Na análise efectuada admitiu-se para os maciços estabilizadores de natureza xistosa e núcleo argiloso um teor em água cerca de 1% abaixo do óptimo do ensaio de Proctor normal.

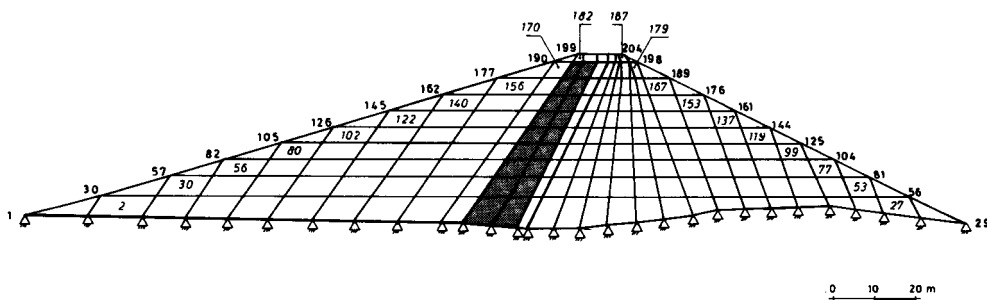


Fig. 15 – Discretização em elementos finitos da secção transversal máxima da barragem “Orov”

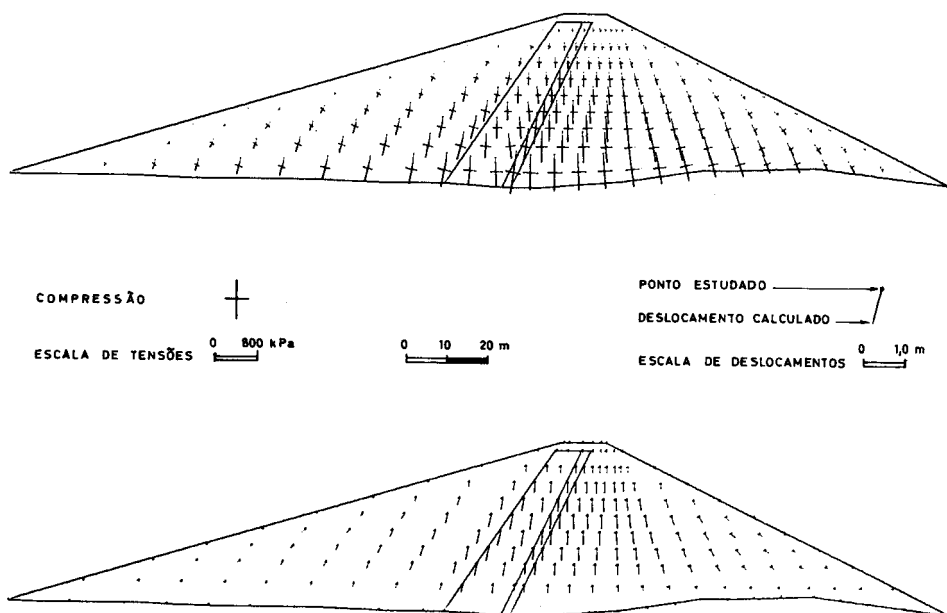


Fig. 16 – Tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem “Orov” (núcleo lado seco)

A Fig. 16 ilustra os valores das tensões principais no centro dos elementos e os deslocamentos dos pontos nodais no final da construção.

A Fig. 17 apresenta a distribuição das tensões principais no final do enchimento da albufeira. Os valores dos deslocamentos dos pontos nodais resultam da sobreposição das grandezas calculadas no final da construção com os valores induzidos pelo enchimento.

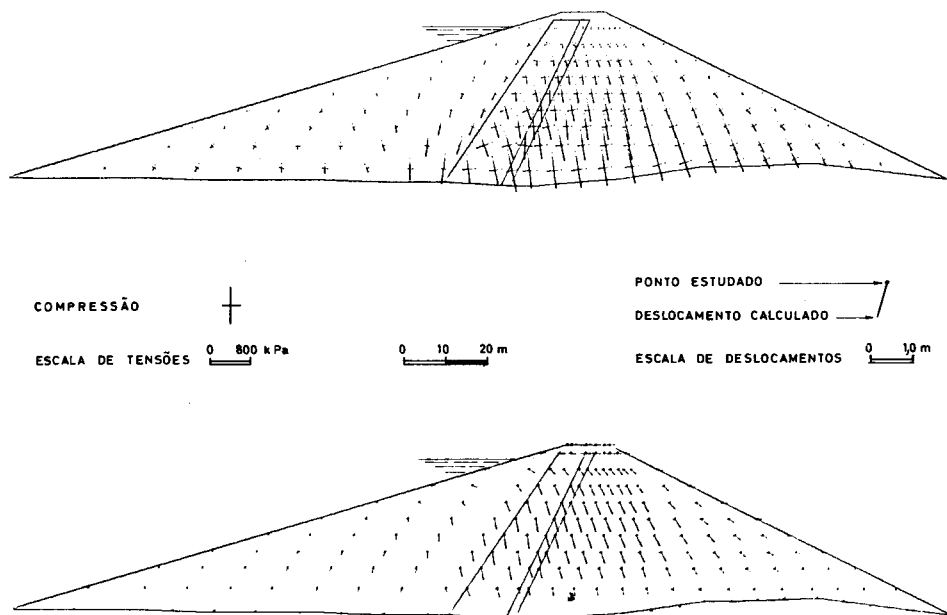


Fig. 17 – Tensões principais e deslocamentos no final do enchimento da barragem "Orov" (núcleo lado seco)

Na Fig. 18 faz-se uma análise comparativa entre as tensões principais totais dos elementos da face de montante e a pressão de água da albufeira. Como as tensões σ_1 e σ_3 após o enchimento da albufeira exibem valores superiores a $\gamma_w h$ será pouco provável o aparecimento de fracturação nos planos normais a estas tensões, sendo no entanto possível a ocorrência de fendas transversais no plano normal à tensão σ_y .

Os resultados obtidos reflectem o efeito favorável do posicionamento do núcleo na distribuição das tensões.

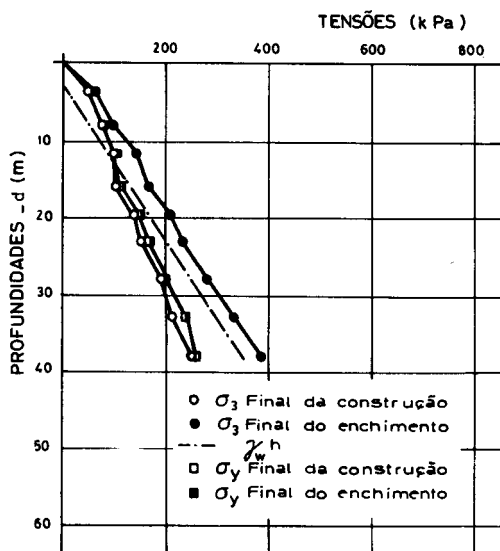
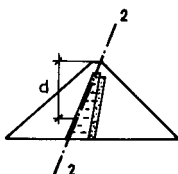
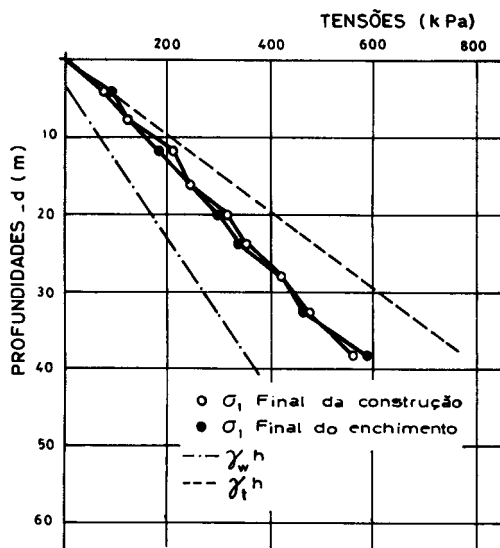


Fig. 18 – Evolução das tensões principais com a profundidade na secção 2-2 da barraem “Orov” (núcleo lado sêco)

3.4.6 – Núcleo inclinado para montante e flexível

Neste cálculo considerou-se para os maciços estabilizadores um teor em água aproximadamente 1% abaixo do ótimo do ensaio de Proctor normal e o núcleo com um teor em água cerca de 1,5% acima do ótimo.

A Fig. 19 mostra os valores das tensões principais no centro dos elementos e os deslocamentos dos pontos nodais no final da construção.

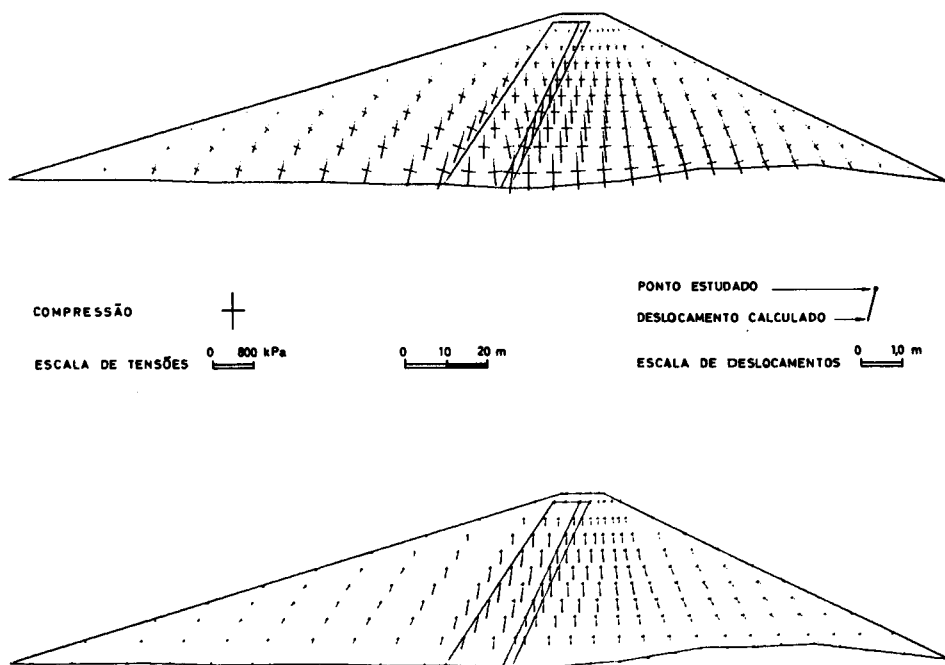


Fig. 19 – Tensões principais e deslocamentos no final da construção da barragem "Orov" (núcleo lado húmido)

A Fig. 20 apresenta a distribuição das tensões principais no final do enchimento da albufera. Os valores dos deslocamentos dos pontos nodais resultam da sobreposição das grandezas calculadas no final da construção com os valores induzidos pelo enchimento.

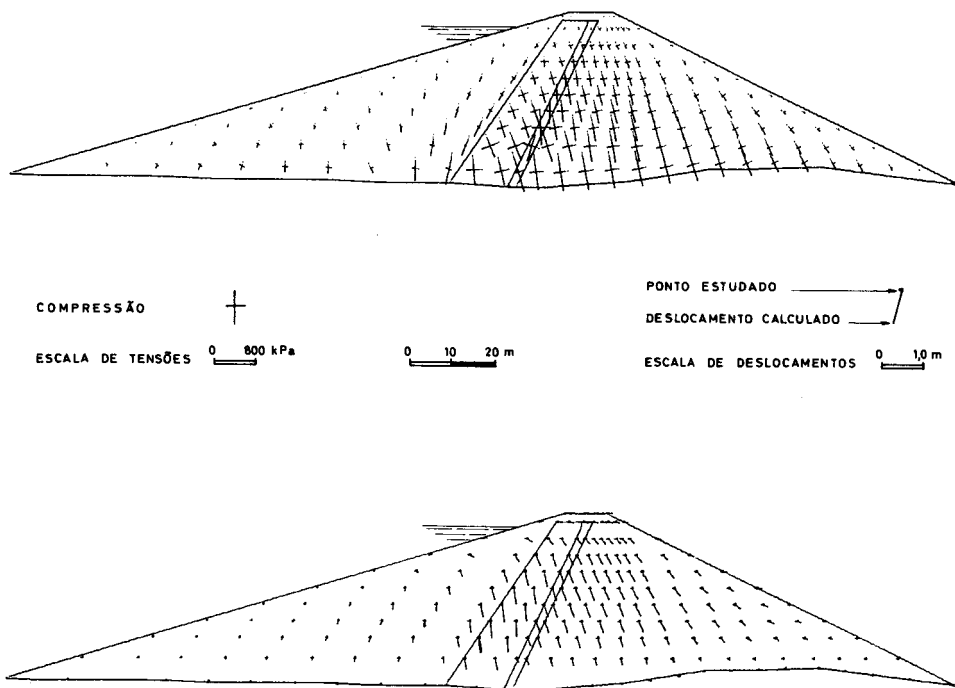


Fig. 20 — Tensões principais e deslocamentos no final do enchimento da barragem "Orov" (núcleo lado húmido)

Analisa-se comparativamente na Fig. 21 a variação com a profundidade das tensões totais principais dos elementos da face de montante do núcleo e os valores correspondentes ao nível de água da albufeira. Como os valores das tensões σ_1 , σ_3 e σ_y são superiores a $\gamma_w h$ a possibilidade de fracturação hidráulica será praticamente inexistente.

Os resultados obtidos confirmam as vantagens inerentes à colocação dos materiais do núcleo com um teor em água acima do óptimo.

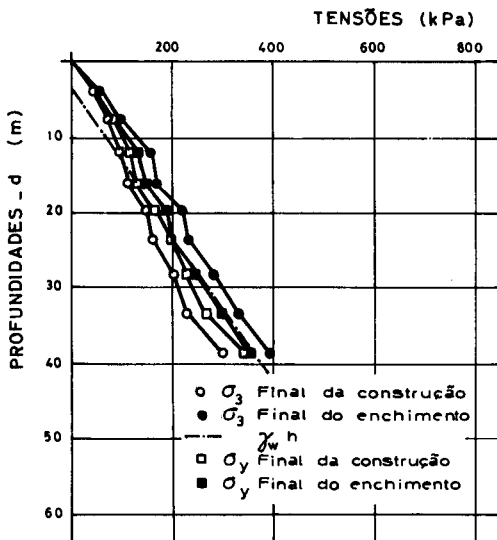
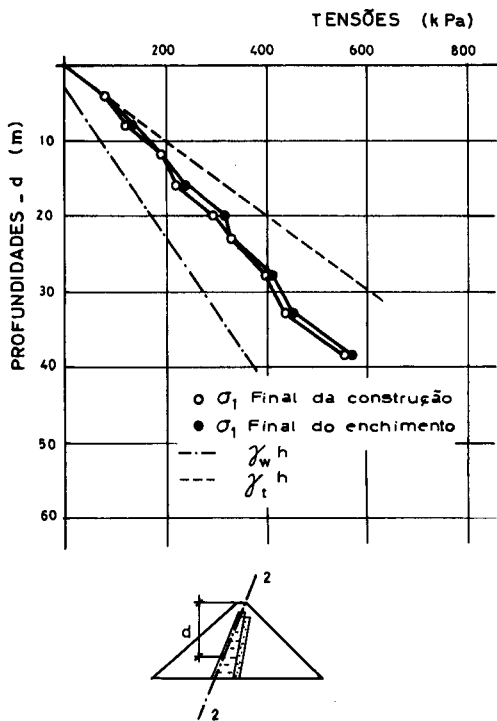


Fig. 21 — Evolução das tensões principais com a profundidade na secção 2-2 da barragem "Orov" (núcleo lado húmido)

3.4.7 – Análise dos resultados

Nas Figs. 22 e 23 faz-se a comparação entre os valores dos deslocamentos verticais e horizontais observados no fim do período construtivo da barragem do Alvito e os valores previstos pelo modelo de cálculo utilizado, podendo-se constatar uma boa concordância face à ordem de grandeza das precisões que são de esperar neste tipo de análises [7].

A boa aderência entre os valores dos deslocamentos calculados e observados permite concluir que, no presente caso, as amostras preparadas em laboratório reconstituem em termos médios os arranjos estruturais introduzidos pelos equipamentos de compactação.

DESLOCAMENTOS VERTICAIS (m)

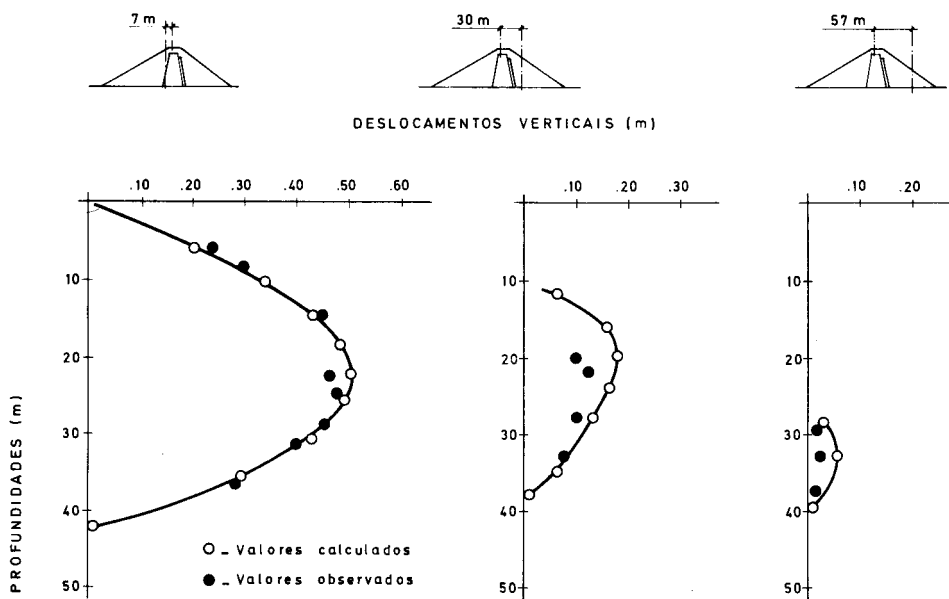


Fig. 22 – Comparação entre os valores observados e os valores previstos dos deslocamentos verticais

DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS (mm)

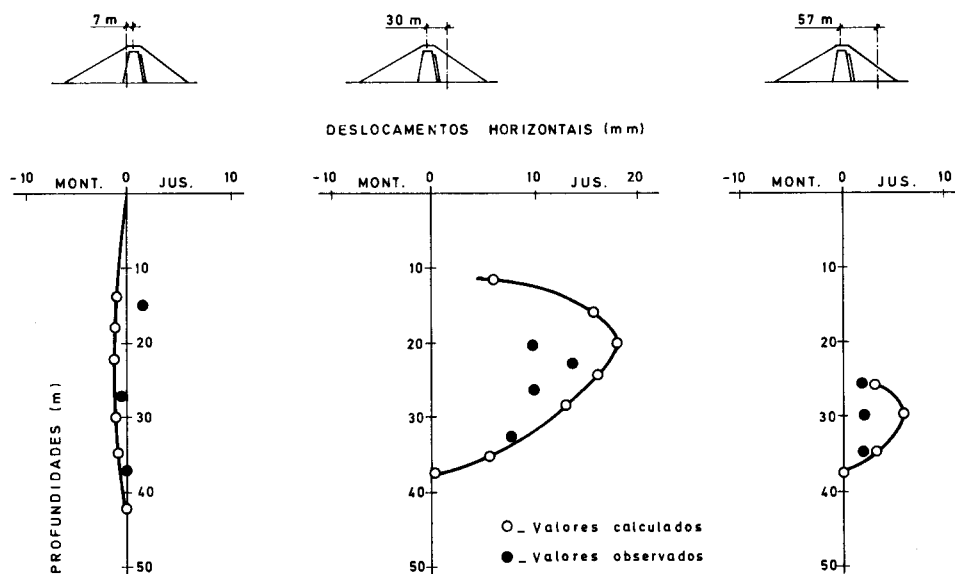


Fig. 23 – Comparação entre os valores observados e os valores previstos dos deslocamentos horizontais

Os valores previstos pelo modelo de cálculo apontam no sentido de que a possibilidade de ocorrência da fracturação hidráulica da barragem do Alvito se situa a um nível baixo e evidenciam o efeito favorável na distribuição das tensões da existência de núcleos espessos, núcleos ligeiramente inclinados para montante, e de núcleos exibindo um teor em água aproximadamente 1,5% acima do teor óptimo do ensaio de Proctor normal.

Em síntese: a fiabilidade dos valores previstos pelo método dos elementos finitos implica a calibração das características reológicas dos materiais tendo em conta as condições reais, o que poderá ser feito através da informação fornecida pela observação.

4 – CONCLUSÕES

Do estudo efectuado são pertinentes as seguintes conclusões:

- 1) Face aos relativamente pequenos encargos da observação, cujo valor é da ordem de 1 a 2% do custo da obra, é aconselhável a sua efectivação pois fornece ao projectista a possibilidade de testar as hipóteses do projecto.

- 2) A localização dos dispositivos de observação deve contribuir para uma clara e objectiva interpretação dos resultados, no sentido de se poder ajuizar a segurança da barragem sem agravar substancialmente o custo do equipamento. O ponto óptimo situa-se no equilíbrio destas duas posições antagónicas.
- 3) A comprovação dos valores previstos pelo método dos elementos finitos implica a calibração das características reológicas dos materiais tendo em conta as condições reais o que poderá ser feito através da informação fornecida pela observação.
- 4) As potenciais zonas de fissuração devem ser localizadas e contempladas com dispositivos de observação para um melhor controlo do fenómeno e para que o grau de segurança da estrutura se mantenha a um nível satisfatório. Estando o risco da rotura vinculado a fenómenos de erosão interna as grandezas observadas darão sinais premonitórios.
- 5) A existência de núcleos espessos, núcleos ligeiramente inclinados para montante, e de núcleos com um teor de água ligeiramente acima do óptimo do ensaio de Proctor normal favorece a distribuição das tensões, diminuindo a possibilidade de fracturação hidráulica.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao LNEC o suporte para a realização deste trabalho e à DGRAH a autorização para publicar os resultados da observação da barragem do Alvito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INDEPENDENT PANEL TO REVIEW CAUSE OF TETON DAM FAILURE (1976) — *Report to U. S. Department of the Interior and the State of Idaho on Failure of Teton Dam*. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- [2] KENNARD, M. F., PENMAN, A. D. M. E VAUGHAN, P. R. (1967) — *Stress and Strain Measurements in the Clay Core at Balderhead Dam*. Trans. 9th I.C.O.L.D., Instambul, vol. III, pp. 129-151.
- [3] VAUGHAN, P. R., KLUTH, D. J., LEONARD, M. W. e PRADOURA, H. H. M. (1970) — *Cracking and Erosion of the Rolled Clay Core of Balderhead Dam and the Remedial Works Adopted for its Repair*. Trans. 10th I.C.O.L.D., Montreal, vol. I, pp. 73-93.
- [4] I.C.O.L.D. (International Committee on Large Dams) (1979) — *Deterioration Cases Collected and their Preliminary Assessment*. Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs.
- [5] SÊCO E PINTO, P. S. (1982) — *Observação de Barragens de Aterro*. Seminário 281, LNEC, Lisboa.
- [6] SÊCO E PINTO, P. S. (1983) — *Fracturação Hidráulica em Barragens de Aterro Zonadas*, Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.
- [7] SÊCO E PINTO, P. S. (1981) — *A Problemática da Observação do Dimensionamento das Barragens de Aterro*. Tese de Mestrado em Mecânica dos Solos. Universidade Nova de Lisboa.