



## **Barragens de concreto em abóbada com dupla curvatura.**

Na década de 60, época do projeto e da construção da barragem do FUNIL no Rio de Janeiro, foram publicados vários artigos na revista ESTRUTURA pelos projetistas da obra.

Essa barragem do Funil é de concreto em abóbada com dupla curvatura.

O projeto foi feito por engenheiros portugueses, Manuel Rocha e Laginha Serafim, do LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Não havia computador disponível, nem elementos finitos que pudessem ser usados. Foram feitos modelos reduzidos, e as medições serviram de base para o projeto.

Portugal tem construído, desde 1950, muitas barragens de concreto em abóbada, a última em 2004.

Com o atual fácil acesso aos computadores e aos elementos finitos, a elaboração dos projetos avançou muito.

Os modelos reduzidos também continuam sendo muito usados.

Esses modelos reduzidos de hoje dispõem de novos materiais, de técnicas poderosas de aquisição de dados, de sensores em fibras óticas etc...

Com a atual tecnologia avançada do concreto, a construção produz concretos com baixo calor de hidratação, o que reduz os riscos de fissuração nas barragens.

Portugal continua na vanguarda dessas técnicas aplicadas às barragens em abóbadas com dupla curvatura.

Algumas recentes teses de pesquisa sobre esse tema estão citadas nos textos, mostrando o atual estágio do desenvolvimento em Portugal.

...

A Barragem de Alqueva ( 520 megawatts) é a maior **barragem** da Europa Ocidental. Sua operação teve início em 2004.

Ver, a seguir, nos artigos publicados na revista ESTRUTURA, os conceitos usados na década de 60 no projeto da barragem do Funil / RJ.

Foram adicionadas algumas fotos para ilustrar o texto.

# ESTRUTURA

REVISTA TÉCNICA

DAS CONSTRUÇÕES



ARQUITETURA MODERNA  
CONCRETO PROTENDIDO  
BARRAGENS  
METODO RUSSO PARA O CONCRETO ARMADO  
LINHAS DE INFLUÊNCIA  
MECÂNICA DOS SOLOS  
LAJES RETANGULARES  
TEORIA DAS PLACAS

12

1958

- Revista editada pelo Prof. Aderson Moreira da Rocha
- Prof. Manuel Rocha – Modelos Reduzidos de Barragens de Concreto  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa

# PROJETO E OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS ARCO EM PORTUGAL

M. ROCHA, J. LAGINHA SERAFIM e A. F. DA SILVEIRA

(Conclusão)

## BARRAGEM DE CANIÇADA

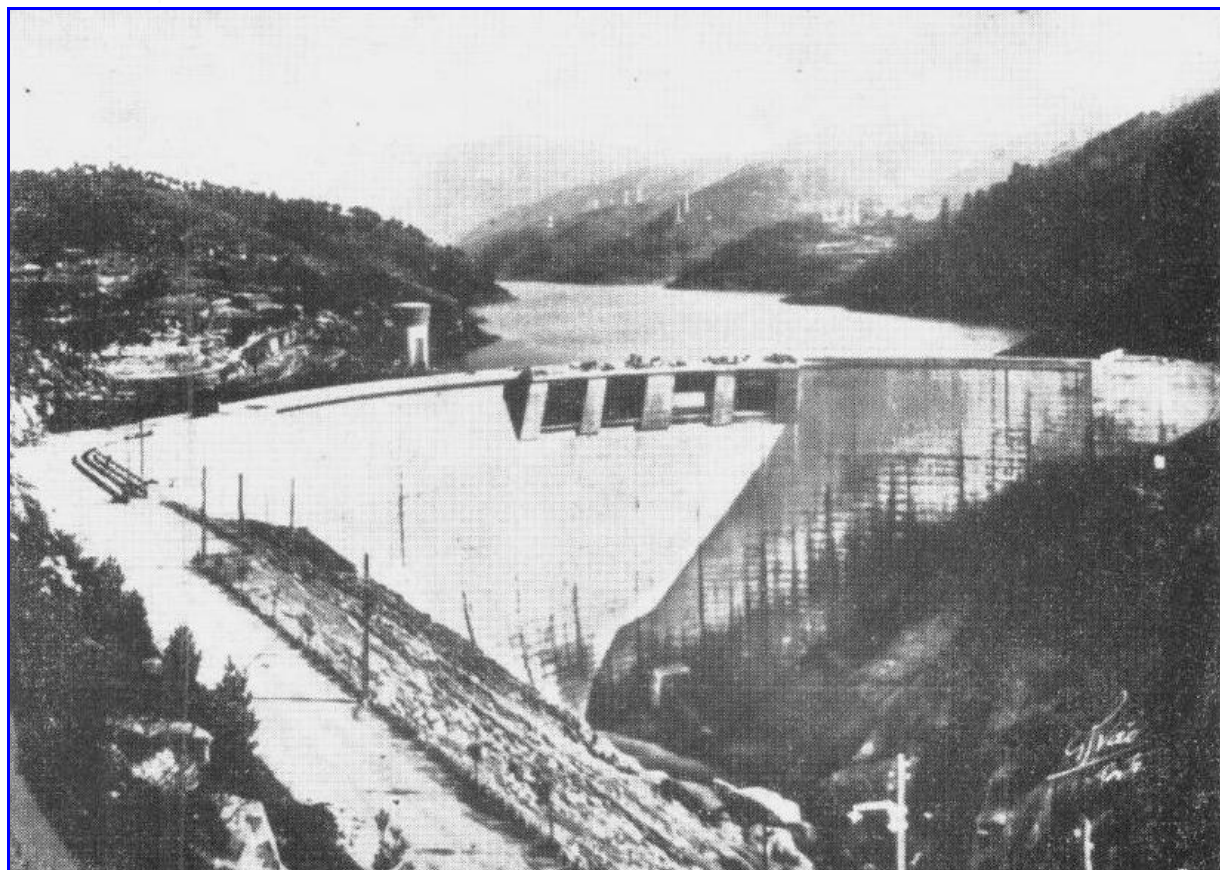


Fig. 1 E — Barragem de Caniçada.

A barragem de Caniçada (Fig. 1 E) é uma estrutura com uma forma muito semelhante à da barragem de Salomonde e cujo traçado beneficiou-se bastante dos estudos feitos para esta última. Após um primeiro estudo sobre modelos foi reconhecido interesse em aumentar ligeiramente as espessuras das nascenças dos arcos inferiores. O estudo final em modelos permitiu concluir que as formas ensaiadas eram satisfatórias.

Na Fig. 22 pode ver-se um dos modelos desta barragem com as isostáticas traçadas nos dois paramentos obtidas pela técnica dos vernizes frágeis e na Fig. 23 vê-se a montagem de extensómetros eléctricos no paramento de jusante e o saco de borracha no qual se faz subir o mercúrio que reproduz a pressão hidrostática.

As comparações entre as tensões de cálculo “trial load” simplificado e do modelo também permitir conclusões

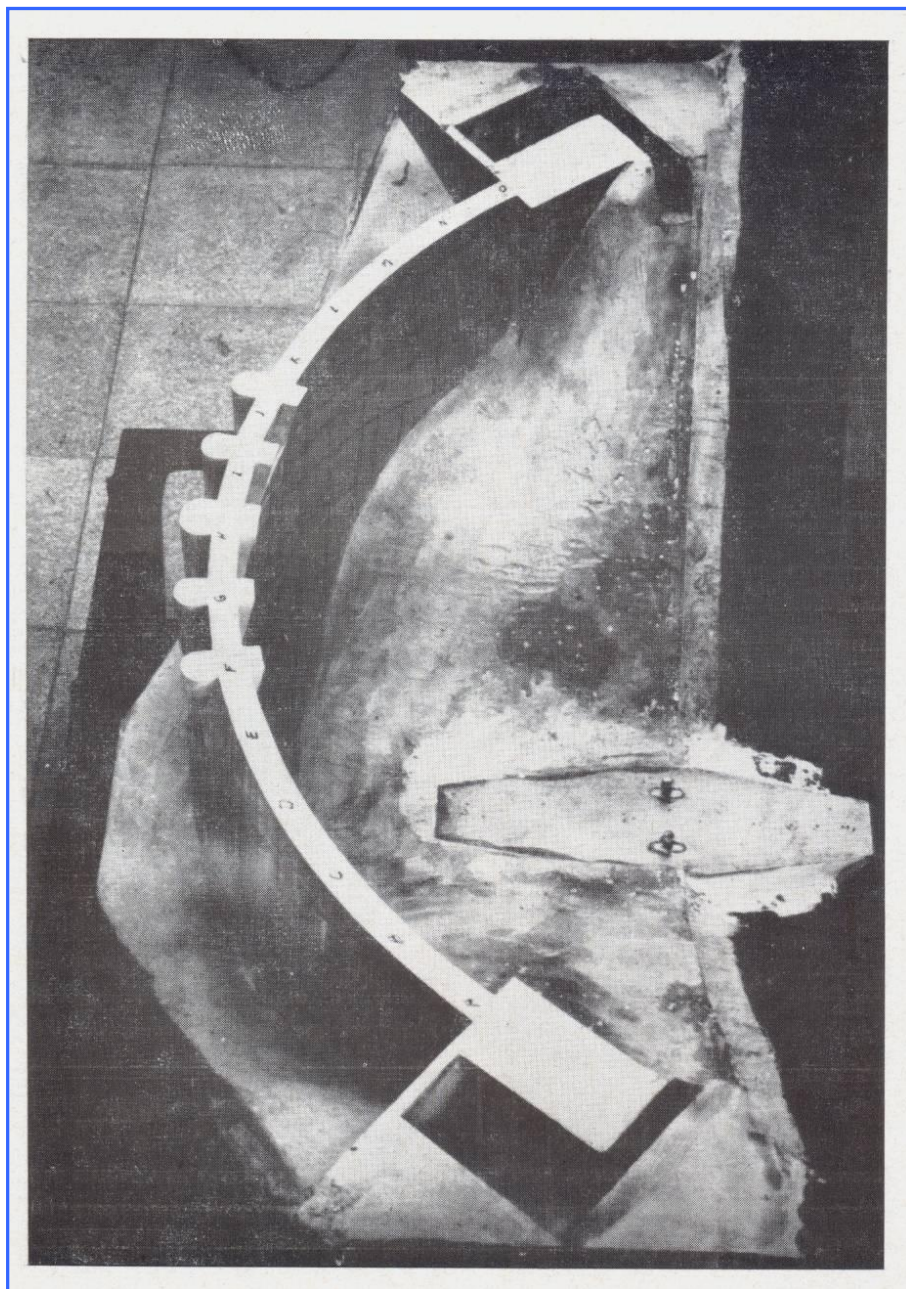


Fig. 22 — Barragem de Caniçada.  
Isostáticas nos paramentos do modelo.

análogas às apresentadas anteriormente.

Os diagramas dos deslocamentos radiais da barragem (Fig. 24) dados pelo pêndulo e pelo método geodésico apresentam uma concordância muito satisfatória, sendo o afastamento entre os diagramas devido ao deslocamento

do ponto *P* de referência do pêndulo. Os deslocamentos dados pelo modelo concordam bastante bem com os deslocamentos sofridos pelo protótipo entre as épocas *C* e *D* dado que entre estas épocas as variações de temperatura são pequenas. Os valores dos deslocamentos dados pelo cálculo concor-

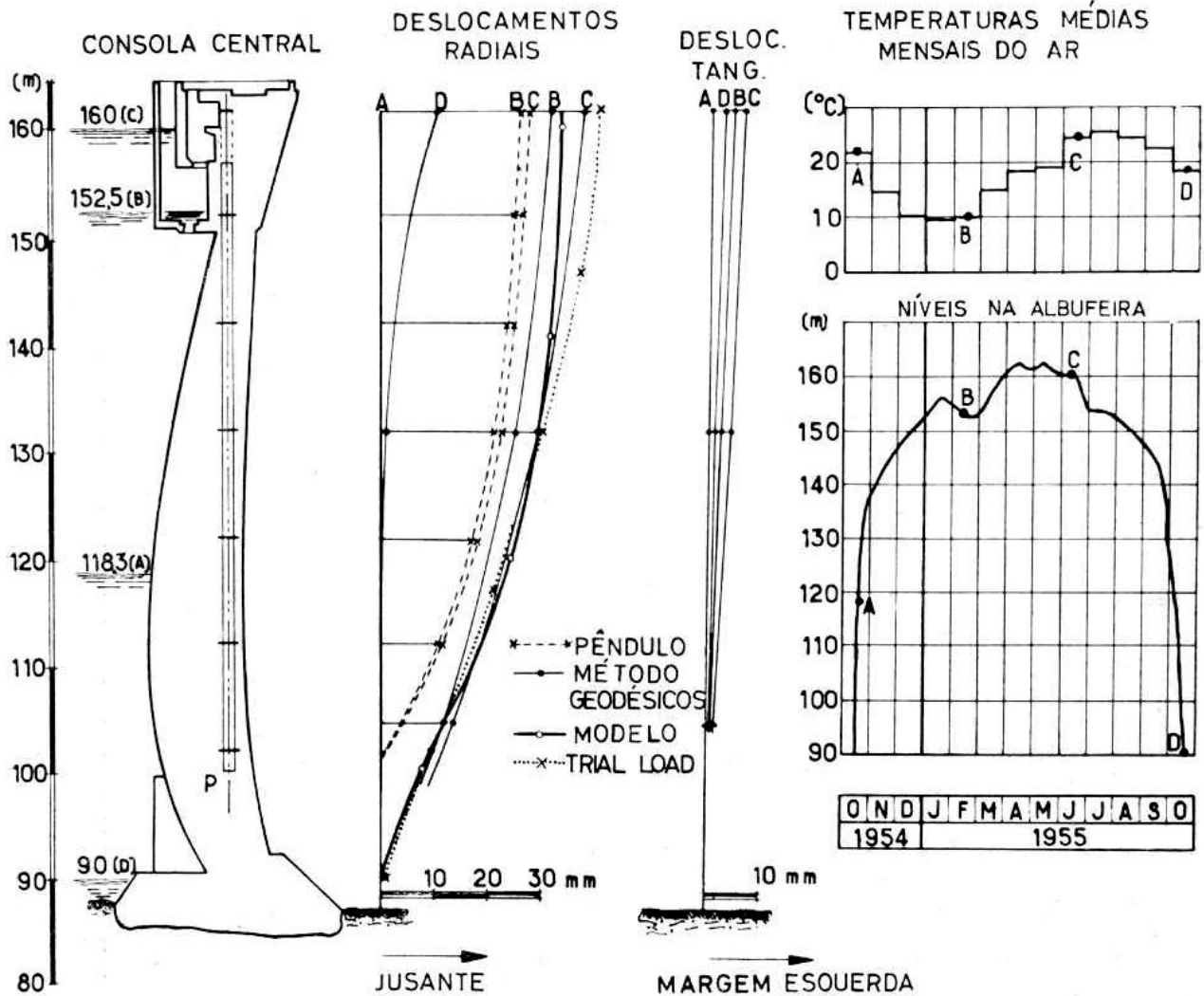


FIG. 24- BARRAGEM DE CANIÇADA. Deslocamentos horizontais observados na consola central

dam bastante bem com os dados pelo modelo afastando-se destes somente na parte superior.

Na Fig. 25 estão traçados os diagramas das tensões medidas a montante, a jusante e a meio de uma seção da barragem de Caniçada junto da

fundação, por meio de células Carlson. Essas células foram colocadas a 45° de forma a receberem os esforços normais à superfície de fundação. A célula nº 2 acusa uma compressão inicial de cerca de 13 kgem<sup>2</sup> devida à subida de temperatura do betão resultante do

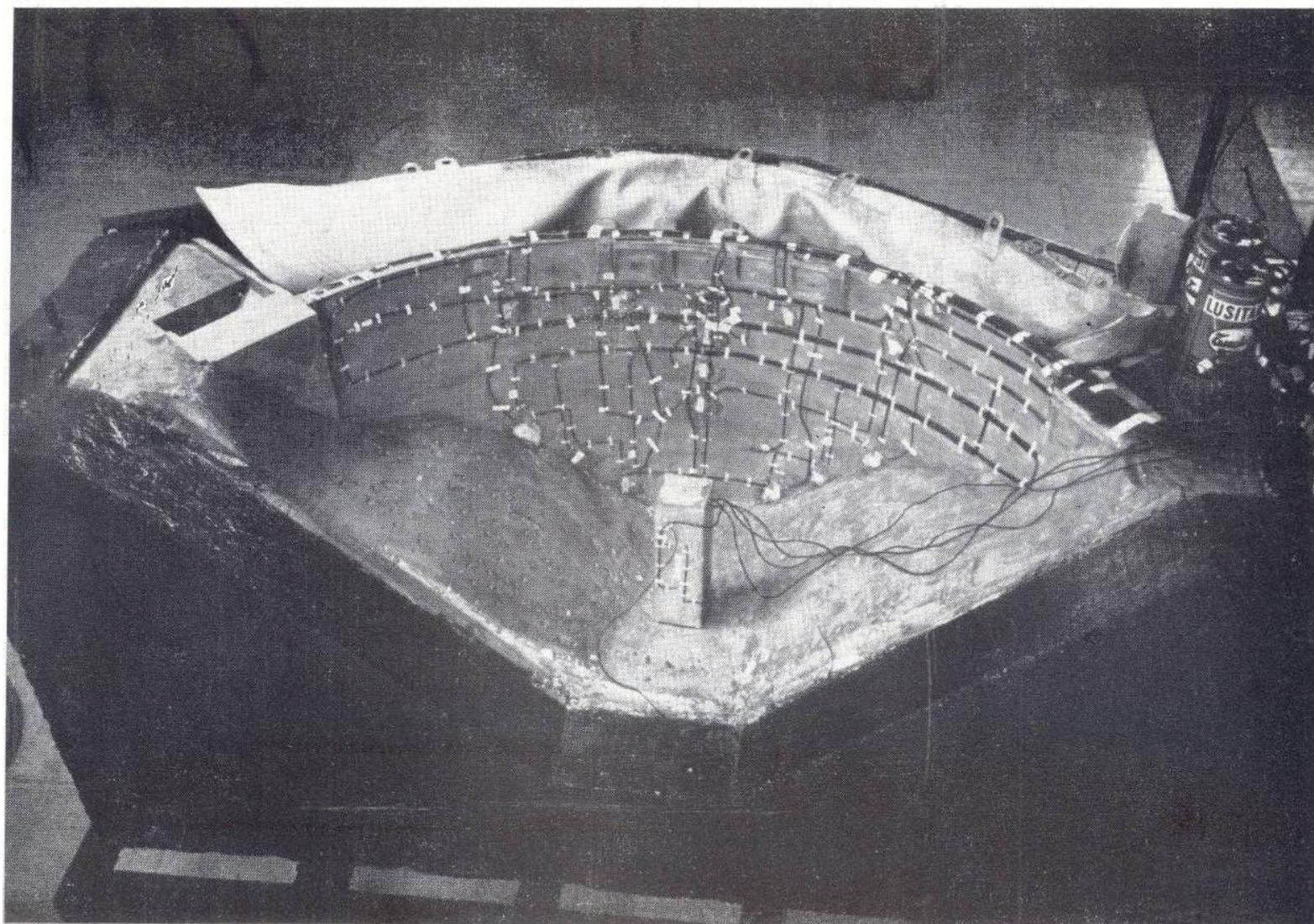


Fig. 23 — Barragem de Caniçada.  
Estensômetros elétricos colocados no paramento de jusante.

desenvolvimento do calor de hidratação do cimento. Entretanto as células 1 e 3 acusaram ligeiras trações. Com a descida de temperatura do bloco e o crescimento deste, a célula 1 passou a acusar a compressão do peso próprio, pois o bloco é inclinado para montante, e a 3 a acusar uma tração também devida ao peso próprio. No entanto essa tração é compensada pela compressão devida ao arrefecimento do interior da barragem. Esse arrefecimento tem tendência a dar origem a trações detetadas pela célula 2, que no entanto são compensadas pelas compressões do peso próprio. Quando se iniciou o enchimento da albufeira, a célula 1 que já vinha acusando descompressão em agosto de 1954 devido à descida de temperatura dos paramentos em relação ao núcleo, continuou a descomprimir, agora devido também ao efeito da subida de nível. A célula 3 acusa muito nitidamente as compressões devidas à subida de nível e a célula 2 tem um andamento intermédio.

No princípio de maio de 1955 a temperatura do betão dos paramentos começou a subir e imediatamente se acentuaram as compressões nas células 3 e 1 passando a célula 2 a acusar uma descida de nível verificada em outubro de 1955 a célula 3 acusa a descompressão devida ao efeito da pressão hidrostática, efeito esse que é acentuado mais ainda pela descida simultânea da temperatura do betão a jusante. Ao mesmo tempo a célula 1 acusa um

aumento das compressões devidas à descida de nível. Quando a água sobe de novo a célula 3 acusa de novo compressão e a célula 1 descompressão. A célula 2 acusa também uma compressão que deve ser devida principalmente ao arrefecimento dos paramentos em relação ao núcleo e não à pressão hidrostática.

Os ensaios em modelo desta barragem deram —  $50 \text{ kgcm}^{-2}$  e +  $18 \text{ kgcm}^{-2}$  respectivamente a jusante e a montante no mesmo local onde foram colocadas as células para tensões a  $45^\circ$ . Estas tensões são muito superiores às dadas pelas células que foram respectivamente —  $17 \text{ kgcm}^{-2}$  e +  $10 \text{ kgcm}^{-2}$  entre outubro de 1954 e abril de 1955 quando a albufeira se encheu. Os valores muito menores dados pelas células podem em parte mas não completamente ser explicados por efeitos térmicos localizados.

Antes do início da construção da barragem foi feito um estudo da previsão de temperaturas pois se pretendia, para acelerar a construção, betonar com camadas de 2 m intervaladas de 4 dias. Foi usado um betão com a dosagem de 250 kg de cimento por metro cúbico. Esse cimento desenvolvia aos 3 dias 63 calorías por grama, aos 7 dias 71 calorías por grama e aos 28 dias 84 calorías por grama. Na Figura 26 estão indicados para duas direções da barragem o diagrama de temperaturas medidas e de temperaturas calculadas que concordam muito satisfatoriamente entre si.

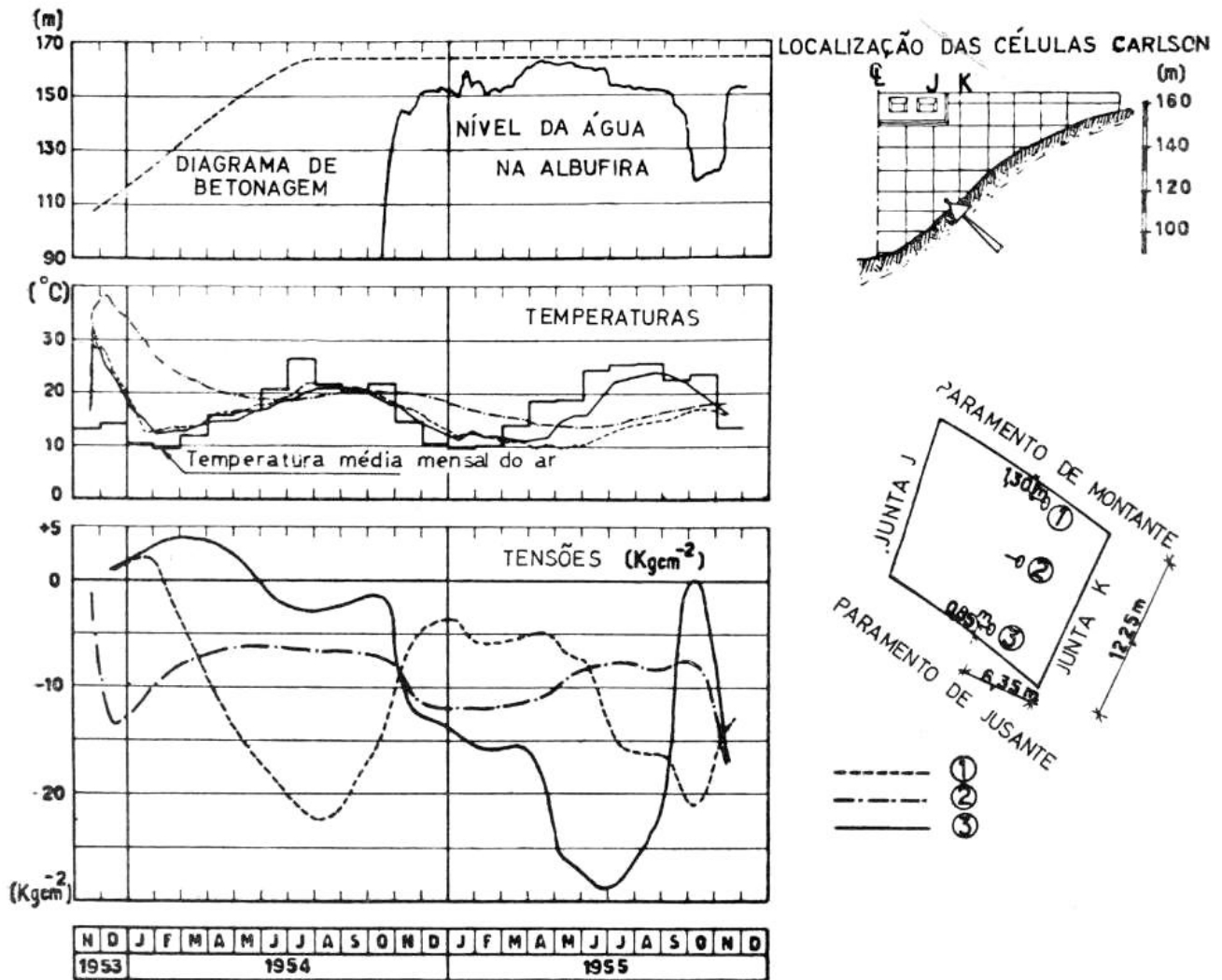


FIG. 25- BARRAGEM DE CANIÇADA . Tensões medidas por intermédio de células Carlson

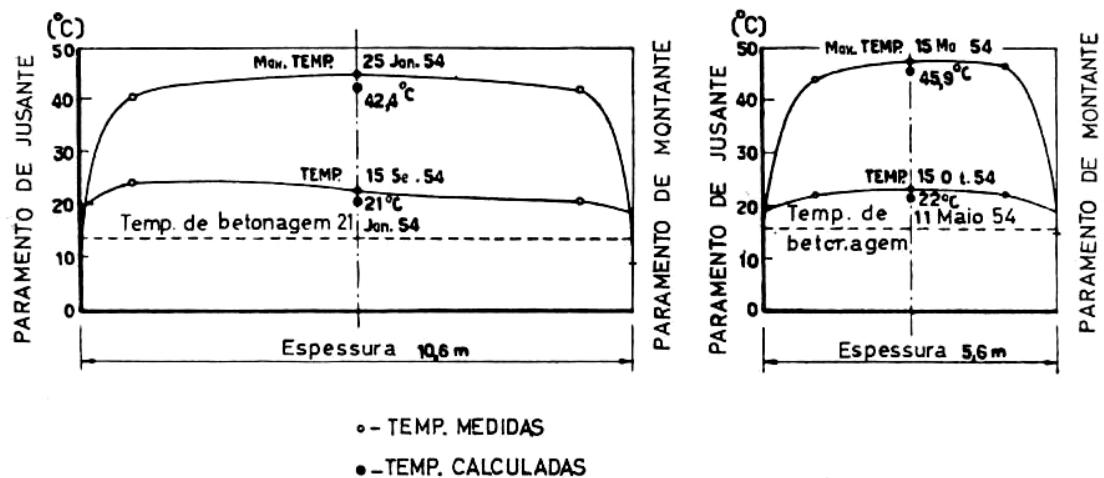


FIG. 26- BARRAGEM DE CANIÇADA . Temperaturas medidas e calculadas em duas secções da barragem



## BARRAGEM DE BOUÇÃ



Fig. 1 F — Barragem de Bouçã

O projeto da barragem de Bouçã (Fig. 1 F) foi como o das barragens anteriores estudado pormenorizada-mente em modelos. Trata-se de uma barragem de dupla curvatura muito acentuada e que pode descarregar sôbre a crista um caudal de  $2.300 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ . Os arcos são de espessura variável e sem filetes. A jusante existe um sôco como na barragem do Cabril. Na Fig. 27 pode ver-se um dos modelos a ser esculpido.

As formas da barragem, são de tal modo favoráveis que se dessem espessuras correspondentes a tensões máximas de  $65 \text{ kgcm}^{-2}$  chegar-se-ia a espessuras tão reduzidas que exigiriam métodos de construção diferentes dos habituais para o betão em massa.

Na Fig. 28 estão indicadas as isostáticas dos dois paramentos, para a

pressão isostática obtida pelo “stress-coat” e os valores das tensões devidas a esta solicitação. Para alguns pontos mais importantes indicam-se os valores das tensões devidas à ação simultânea da pressão hidrostática e do peso próprio.

A barragem que está a ser observada durante as primeiras cargas, ainda não foi injetada. Apesar de já ter passado sôbre a obra uma cheia de  $1500 \text{ m}^3 \text{-seg}^{-1}$ , tendo o nível de montante atingido a cota 179,00 m não se notou qualquer anomalia do comportamento.

Na Fig. 29 apresentam-se as tensões observadas no primeiro enchimento para o nível 174. Estas tensões foram obtidas tal como se referiu para a barragem do Cabril. Constata-se uma certa assimetria de funcionamento

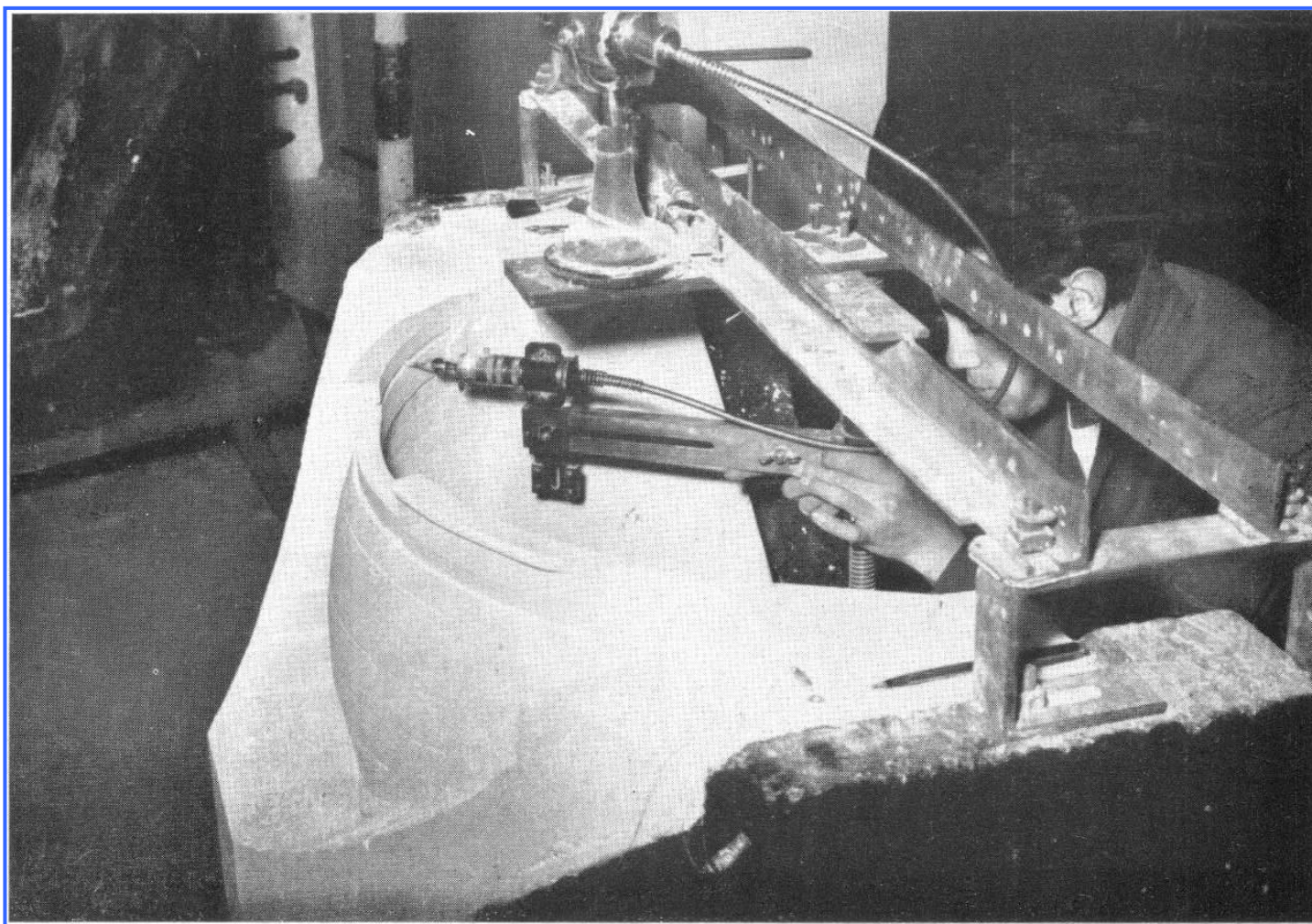


Fig. 27 — Barragem de Bouçã. Construção do modelo.

aliás também verificado nos deslocamentos. Essa assimetria parece poder ser atribuída às condições de exposição ao sol, diferentes para as duas margens.

## VI — CONCLUSÕES

A experiência adquirida em Portugal leva à conclusão que as barragens abóboda constituem, em relação a todos os outros tipos, a solução mais econômica e mais segura sempre que a natureza das fundações o permita e o vale não seja excessivamente aberto. Esta última limitação não é porém tão grande como habitualmente se supõe. Àcerca das fundações também as exigências não são muito severas. As barragens abóboda podem fundar-se sobre rochas bastante deformáveis. Porém só os ensaios realizados nos locais, interessando volumes apreciáveis de rocha, podem fornecer a grandeza da deformabilidade das fundações. Quando se estudem cuidadosamente as formas, as quais dependem fortemente das condições topográficas, podem as barragens abóbodadas ter espessuras muito diminutas, constituindo verdadeiras cascas. Porém não convém que essas espessuras vão abaixo de certos limites quer por razões de ordem construtiva quer para assegurar a estanqueidade. Não pareceu conveniente em Portugal ir abaixo de 2 m.

Com os progressos da aparelhagem de medição puderam desenvolver-se técnicas de estudo de barragens em modelo que permitem uma análise rápida, precisa e econômica das tensões desenvolvidas pela pressão hidrostática e das formas mais adequadas para ca-

da caso. Os materiais a usar nos modelos devem porém obedecer às condições de semelhança mecânica para que essas tensões possam ser conhecidas com a necessária precisão. Nos modelos pode estudar-se a influência da deformabilidade das fundações, de espessamentos locais, de abertura eventual de fendas ou de qualquer outra singularidade.

A observação completa do comportamento das barragens portuguesas tem permitido o controle da sua segurança e, sobretudo, a aferição do valor dos métodos analíticos e experimentais de dimensionamento. Além disso, tem permitido conhecer melhor a influência de certos fatores, como as variações de temperatura, averiguar a influência de outros, tais como os movimentos das margens, e conhecer melhor as propriedades dos materiais e das fundações. Reconhe-se que é indispensável observar continuamente um elevado número de grandezas para que a interpretação das medições se torne possível. As mais importantes destas grandezas são os deslocamentos da barragem e do terreno, as extensões e tensões, as temperaturas, a abertura das juntas, as variações de volume do betão e as subpressões.

Dum modo geral pode afirmar-se que, sempre que tem sido possível separar os efeitos das várias solicitações, é perfeito o acôrdo entre os resultados dos estudos em modelos e os observados nas obras. O mesmo já não acontece com os resultados dos cálculos que por vezes se afastam bastante daqueles. O "trial-load" só com ajustamentos radiais fornece em casos simples, isto é,

em que não haja singularidade, valores das tensões de compressão nos arcos que se aproximam das dadas pelos modelos, mas as trações nas bases das consolas dadas por esse método são exageradas.

Em resultado dos estudos e observações das diversas barragens podem apresentar-se várias conclusões:

O movimento das fundações das barragens pode resultar de causas diferentes da transmissão de esforços da

barragem ao terreno, como é o caso da parte superior da margem direita da fundação da barragem do Castelo do Bode. Tais movimentos podem afetar enormemente as condições de funcionamento da estrutura.

As singularidades das fundações devem ser evitadas. Normalmente as convexidades podem aumentar as tensões quer as de tração quer as de compressão. É por isso sempre aconselhável proceder ao estudo em modelo da

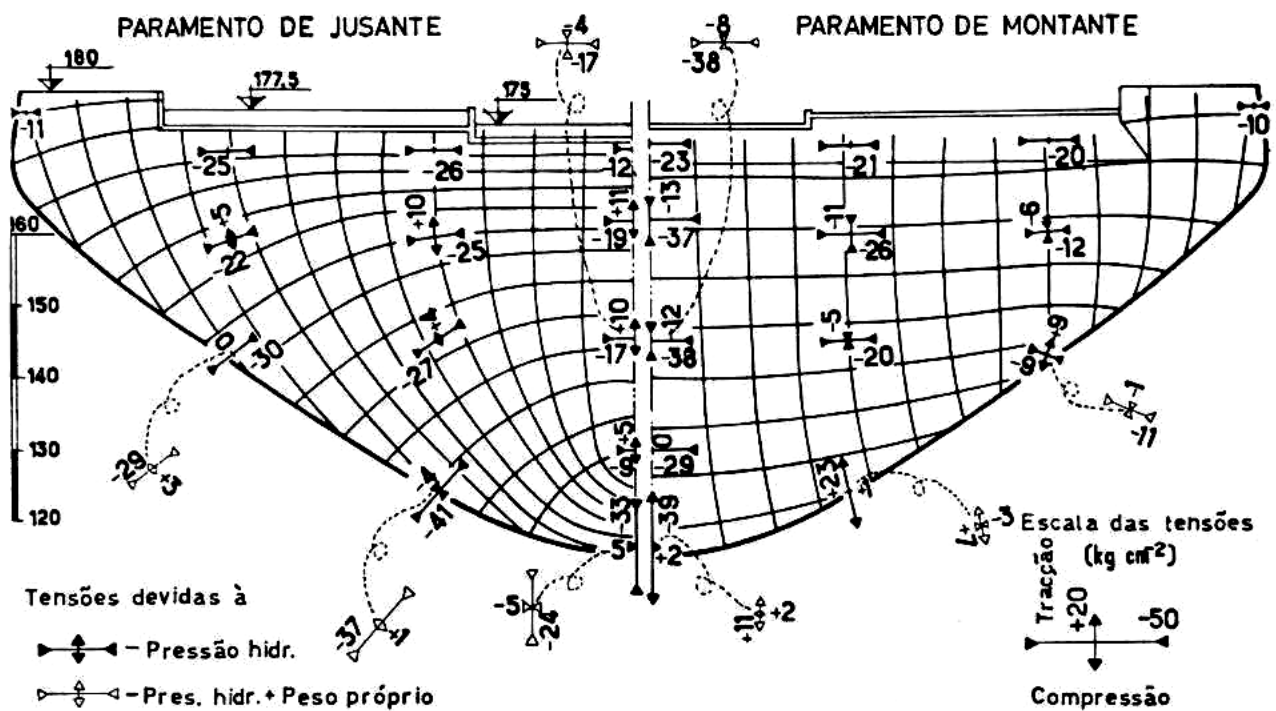


FIG.28- BARRAGEM DA BOUÇA. Tensões obtidas a partir dos ensaios em modelos reduzidos (Carga de mercúrio à cota 177,5)

sua influência e do grau de regularização conveniente do perfil do vale.

Devem ser estudadas com especial atenção as tensões nas faces das aberturas feitas em barragens arco pois que aí se podem desenvolver importantes trações.

Os fenômenos térmicos das barragens são complexos, mas podem ser cal-

culados. A dissipação natural do calor de hidratação provoca compressões importantes junto dos paramentos. Se tais compressões não forem exageradas poderão ser benéficas para a impermeabilidade da obra. Porém, uma vez que a dissipação do calor provoca a abertura de juntas, o meio mais adequado para poder garantir num curto

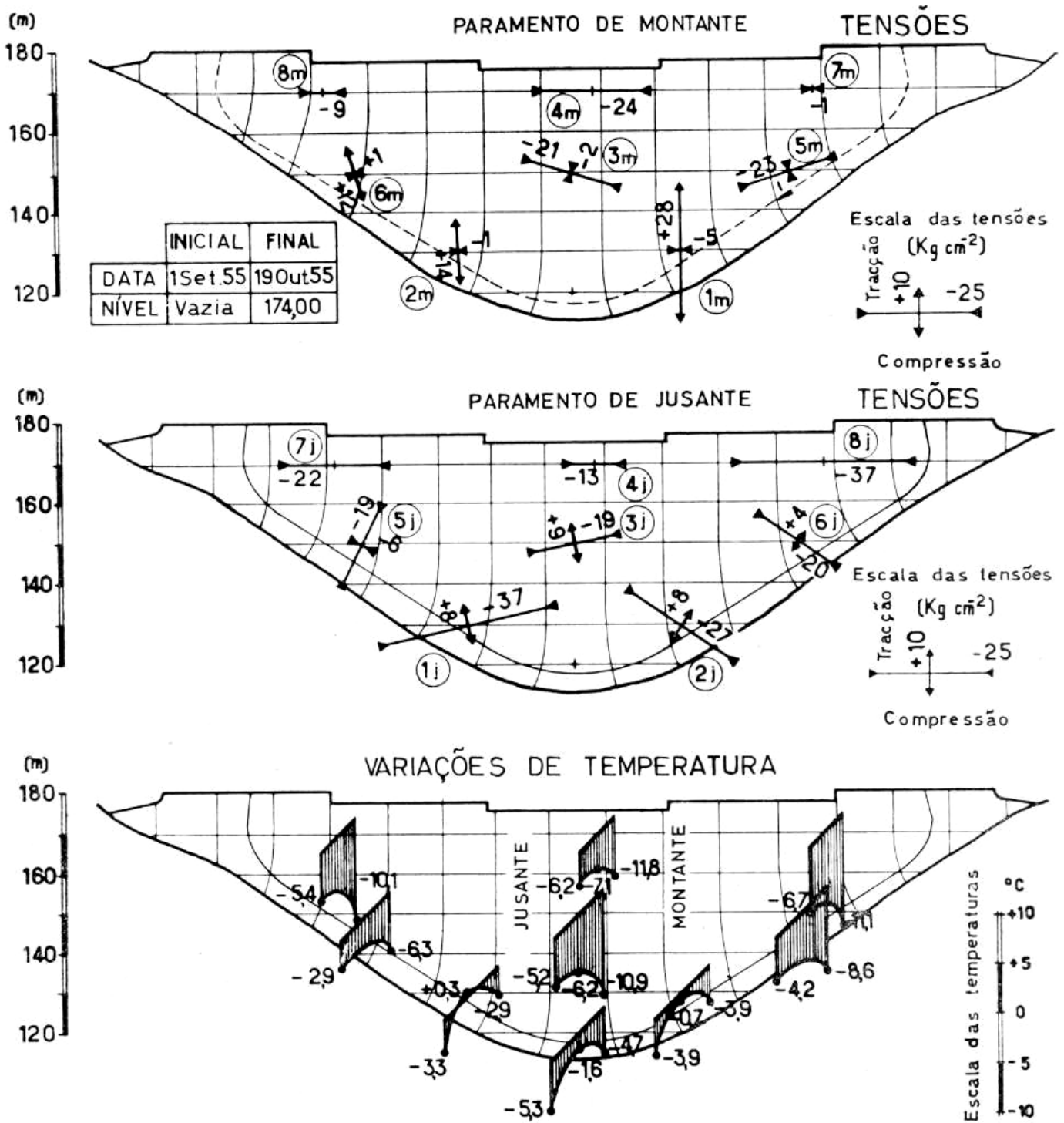


FIG. 29 - BARRAGEM DA BOUÇÃ. Tensões e temperaturas observadas durante o primeiro enchimento

prazo a injeção conveniente das juntas antes da carga é a de proceder ao arrefecimento artificial do betão.

Os deslocamentos devidos à perda de calor e às variações de temperatura exterior são muito importantes. Na parte superior das barragens mais delgadas eles podem atingir a ordem de grandeza dos deslocamentos devido à pressão hidrostática.

As variações de temperatura exterior produzem um efeito de pele que se traduz por um estado de tensão hidrostático paralelamente aos paramentos em toda a barragem. Os valores dessas tensões em cada momento podem estimar-se tomando para cada ponto a diferença entre a temperatura média ao longo de toda a espessura no ponto considerado. É notável o acôrdo entre os resultados das tensões obtidas nos modelos e nas obras fazendo esta

correção para as tensões de origem térmica.

\* \* \*

As várias investigações descritas nesta comunicação foram possíveis por uma colaboração entre o pessoal técnico de várias organizações portuguesas entre as quais queremos mencionar a Direção Geral dos Serviços Hidráulicos, Comissão de Fiscalização de Obras dos Grandes Aproveitamentos Hidro-Elétricos, Hidro Elétrica do Zêzere e Hidro Elétrica do Cávado.

Os engenheiros da Seção de Estudos de Barragens deste Laboratório que contribuíram para o estudo foram Orlando Vieira Rodrigues, Arménio Ferrer de Lemos, José Marques da Ressurreição Neto, João Lobo Fialho, Fernando Peres Rodrigues, Marciano Quarasma Guerreiro e Maria Emília Campos e Matos.

#### Links – Referências

<http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/609/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>

Pedro Filipe Queiroz Sarmiento - Portugal - 2010

Utilização de modelos de elementos finitos tridimensionais no cálculo estrutural de barragens de betão

<http://run.unl.pt/handle/10362/5114>

José Alberto Garcia Meliço – Portugal - 2010

Escolha de formas de barragens abóbada

[http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM\\_1110-2-2201/toc.htm](http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-2-2201/toc.htm)

USACE.ARMY – 1994 - Publication Number: EM 1110-2-2201

Engineering and Design - Arch Dam Design