



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 no texto, 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.

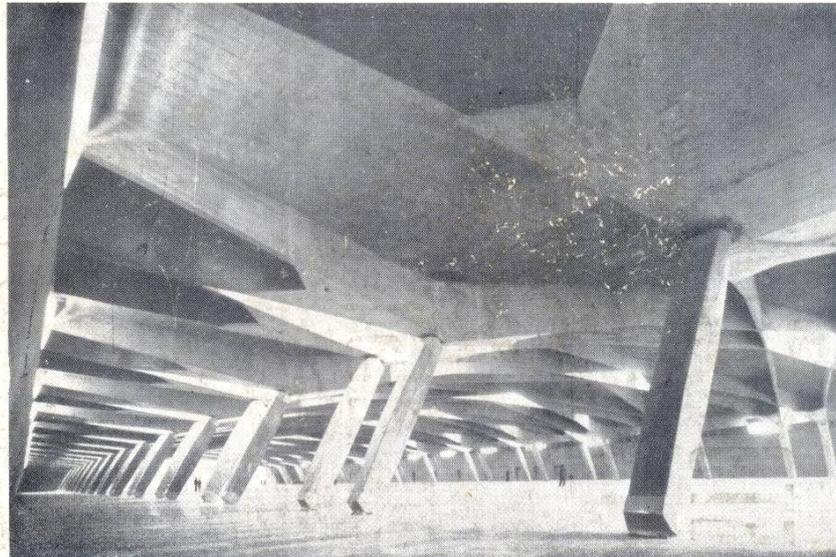
Ver, a seguir, nos artigos publicados na revista ESTRUTURA, os conceitos usados na década de 60 no projeto da barragem do Funil / RJ.

Foram adicionadas algumas fotos para ilustrar o texto.

ESTRUTURA

REVISTA TÉCNICA

DAS CONSTRUÇÕES



NOVAS NORMAS DE FUNDAÇÕES
BARRAGENS ABÓBODA
PLACAS CIRCULARES
ESTRUTURAS RURAIS
TEORIA DAS PLACAS

1960

25

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

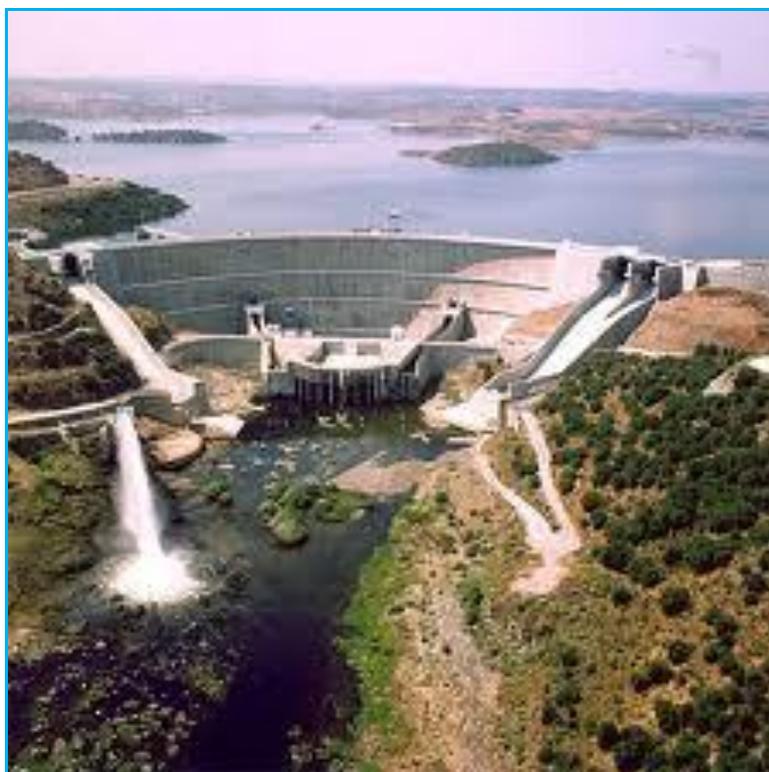
Barragens em abóbodas de concreto



Barragem do Funil - RJ / Brasil - 216 MW.

http://www.furnas.com.br/hotsites/sistema-furnas/usina_hidr_funil.asp

A Usina Hidrelétrica de Funil é diferente das demais usinas de FURNAS. Com uma abóbada de concreto, com dupla curvatura, ela foi construída no rio Paraíba do Sul, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro. Sua operação teve início em 1969.



Barragem de Alqueva - Évora / Portugal - 520 megawatts

<http://www.lnec.pt/organizacao/dbb>

A Barragem de Alqueva é a maior barragem portuguesa e da Europa Ocidental, situada no rio Guadiana, no Alentejo interior, perto da aldeia de Alqueva. Sua operação teve início em 2004.

DETERMINAÇÃO DE TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA DE BARRAGENS ABÓBODA POR MEIO DE MODELOS

MANOEL DA ROCHA * e

J. LAGINHA SERAFIM **

(Cont. do nº 24)

8 — PROGRESSOS FEITOS NO ESTUDO

a) *Determinação do coeficiente de dilatação linear de vários materiais* — Um método bastante adequado para a determinação do coeficiente de dilatação linear dos materiais a utilizar na construção de modelos é o da utilização de extensômetros elétricos. Esse método também permite tirar conclusões acerca do comportamento dos extensômetros e da sua colagem ao material quando submetido a variação de temperatura. O método consiste em colar dois extensômetros iguais, um num provete do material em ensaio, o outro num provete igual de um material padrão com um coeficiente de dilatação térmica bem conhecido. Nos ensaios levados a cabo foram usados, como materiais padrão, o cristal de quartzo cortado numa direção paralela ao eixo ternário ($\alpha = 7,74 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) e o quartzo fundido ($\alpha = 0,54 \times 10^{-6}$).

A fig. 3 mostra os diagramas de extensões devidas a variações de temperatura ΔT , obtidos dos ensaios de dois provetes de cada um dos seguintes metais: aço, alumínio, latão e cobre. Foram colocados dois extensômetros nas duas faces de cada proveta. Estes diagramas mostram que as diferenças entre os pares de extensômetros nunca atingiram $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

A fig. 4 mostra os diagramas obtidos para dois provetes de “perspex”. Outros plásticos como o “alkathène” e “palatal” foram também ensaiados, mas as curvas obtidas mos-

tram que estes materiais não são próprios para ensaios térmicos.

Na fig. 5 apresentam-se os diagramas obtidos para quatro provetes de um micro-betão da mesma amassadura. Ensaio idênticos, levados a cabo com gesso e misturas de gesso e diatomite, mostraram um comportamento inconveniente destes materiais.

b) *Determinação da difusibilidade térmica dos materiais para modelos* — Além da determinação da difusibilidade térmica (h^2) dos materiais dos modelos obtida a partir do valor do coeficiente de condutibilidade térmica determinado pelos métodos correntes, como o método da placa quente, e do calor específico, foi decidido determinar aquela constante térmica também a partir de medições de temperaturas em placas delgadas (espessura l) ou cilindros (raio R) submetidos a abaixamentos ou elevações instantâneas da temperatura exterior. Os diagramas de temperaturas obtidos para vários instantes (t), quando comparados com os diagramas teóricos traçados em função de $\frac{h^2 t}{l^2}$ ou de $\frac{h^2 t}{R^2}$ (fig. 6), permitem a determinação de h^2 . A fig. 7 mostra a distribuição das temperaturas observadas em cilindros de “perspex” ou “alkathène” e os valores da correspondente difusibilidade térmica obtida. Os valores determinados são muito semelhantes aos fornecidos pelos fabricantes destes plásticos e estão indicados no Quadro I. Foi introduzida uma correção nos valores do raio, de maneira

* — Diretor interino do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

** — Chefe da Secção de Barragens.

INDICE DE FIGURAS

- Fig. 1 — Esquema da circulação da água nas serpentinas
- a) Corte
 1. Serpentinas de jusante
 2. Serpentinas de montante
 3. Banho de óleo
 4. Isolamento
 - b) Esquema das serpentinas de jusante
 - c) Esquema das serpentinas de montante
- Fig. 2 — Ensaios preliminares de temperaturas num modelo
- Fig. 3 — Ensaios de dilatação térmica de metais
1. Provete nº 1
 2. Provete nº 2
- Fig. 4 — Ensaios de dilatação térmica do “perspex”
- Fig. 5 — Ensaios de dilatação térmica em provetes de microbetão
- Fig. 6 — Diagramas teóricas de temperatura numa placa e num cilindro
- Fig. 7 — Diagramas de temperaturas medidas num cilindro em “perspex” e num outro em “alkathène” e determinação da sua difusibilidade térmica
- (1) Variação de temperatura no eixo do cilindro
- Fig. 8 — Ensaios de determinação de tensões de origem térmica em metais
- Fig. 9 — Cilindro de “perspex” para determinação de tensões de origem térmica
- Fig. 10 — Pontos de leitura de extensões e temperaturas
1. Cilindro de “perspex”
 2. Isolamento de cortiça
 - G. Extensômetros elétricos
 - T. Pares termoelétricos
- Fig. 11 — Temperaturas e extensões num cilindro de “perspex”
- (1) Variação de temperatura na superfície do cilindros em função do tempo
 - (2) Curvas de calibração dos extensômetros SR-4, tipo A5, colados em “perspex”
 - (3) Extensões medidas pelos extensômetros
 - (4) Variações livres de comprimento que existiriam à superfície
 - (5) Extensões proporcionais às tensões
- Fig. 12 — Modelo em microbetão de uma barragem abóbada para determinação de tensões de origem térmica
- Fig. 13 — Serpentina de jusante
- Fig. 14 — Plano de colocação dos extensômetros e dos pares termoelétricos
- Fig. 15 — Ensaios num modelo de microbetão de uma barragem abóbada
- Fig. 16 — Aparelhagem de registo em ensaio
- Fig. 17 — Diagramas das extensões e temperaturas
- Fig. 18 — Modelo em “perspex” de uma barragem abóbada

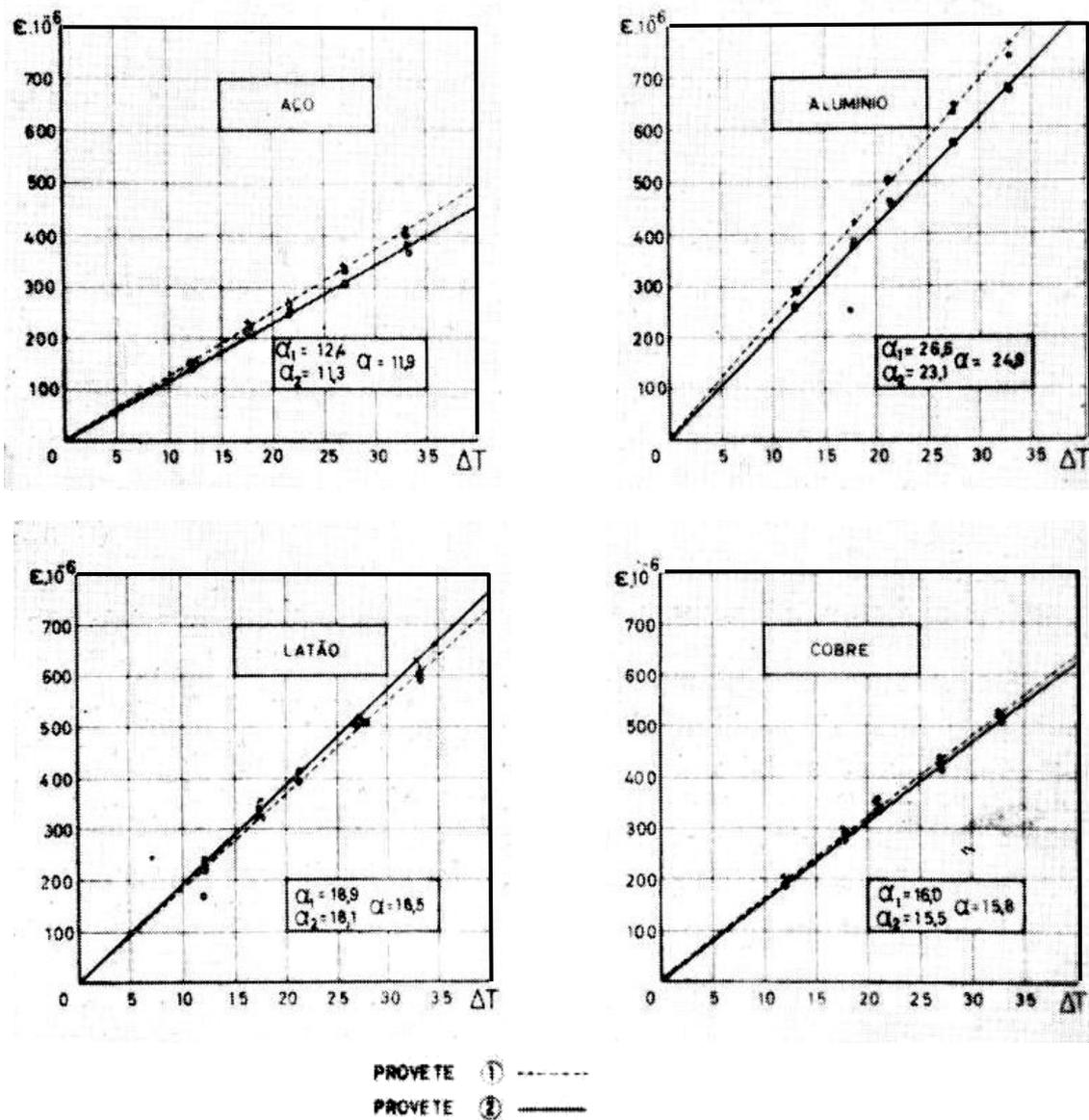


FIG. 3 - ENSAIOS DE DILATAÇÃO TÉRMICA DE METAIS

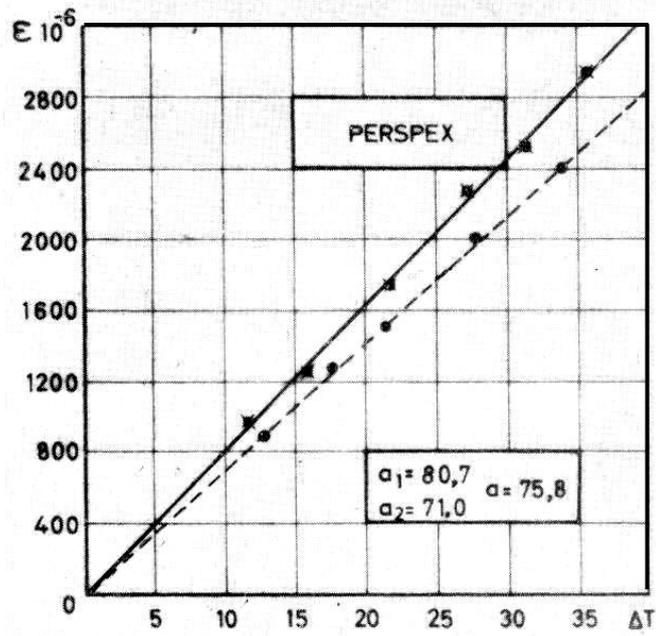
a compensar a variação da temperatura superficial dos cilindros, a qual é suposta constante nos diagramas da fig. 6.

c) *Determinação de tensões de origem térmica em peças bi-metálicas* — Um caso muito simples de tensões devidas a variações de temperatura é o que se obtém em barras paralelas de dois metais diferentes com extremidades mantidas solidárias de maneira a conservarem o mesmo comprimento. Medindo temperaturas e extensões nas barras é possível determinar com exatidão as tensões, que podem ser comparadas com os valores calculados.

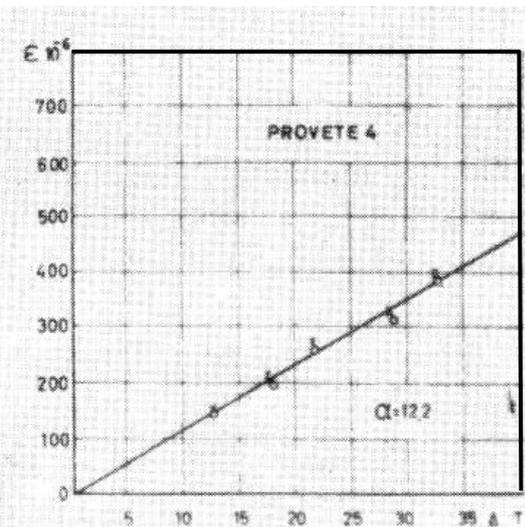
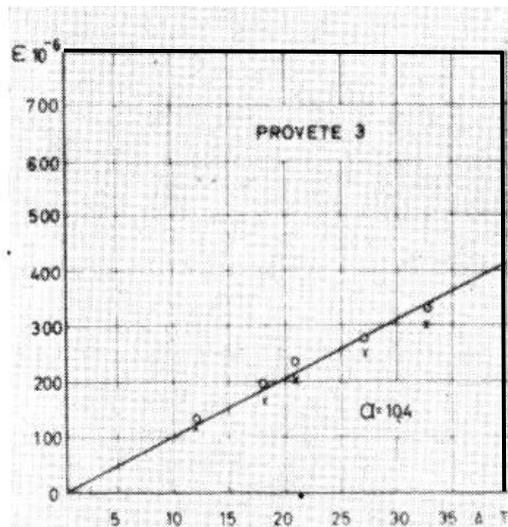
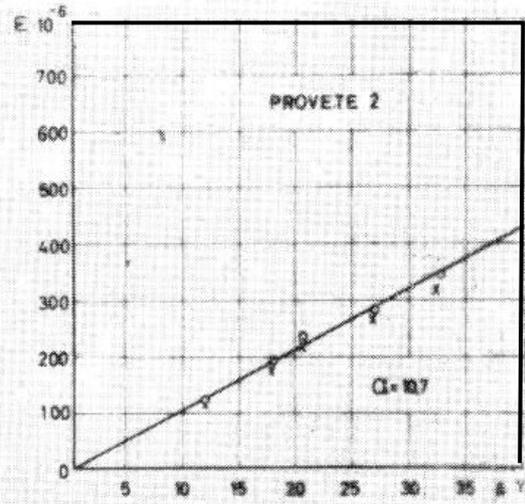
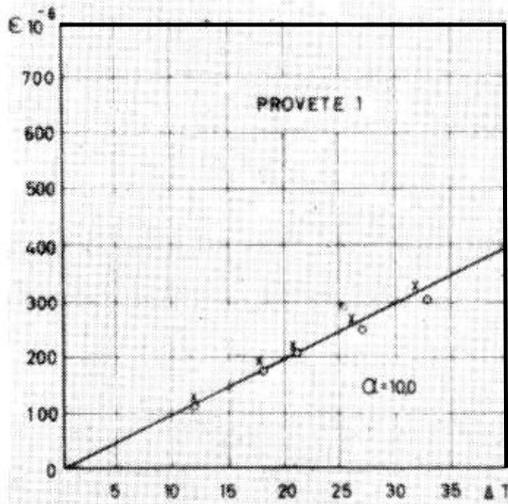
Usaram-se duas barras de alumínio ($\alpha = 25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ligadas rigidamente nas

extremidades a uma barra de aço ($\alpha = 12 \times 10^{-6}$) com $0,3 \times 3 \times 10$ cm. Foram colados em cada barra dois extensômetros SR-4 tipo A5 e usados extensômetros compensadores colados em barras livres dos mesmos materiais (fig. 8).

Realizaram-se vários ensaios, elevando a temperatura das peças até cerca de 20°C . Os valores médios de $\epsilon = \epsilon' - \epsilon''$ para 1°C de variação de temperatura, observados nos ensaios em que se usaram dois extensômetros ativos em cada barra, estão comparados com os valores calculados no Quadro II. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas a uma imperfeita ligação dos topos das barras de alumínio.



PROVETE ① -----
 PROVETE ② —————



Figs.4e5

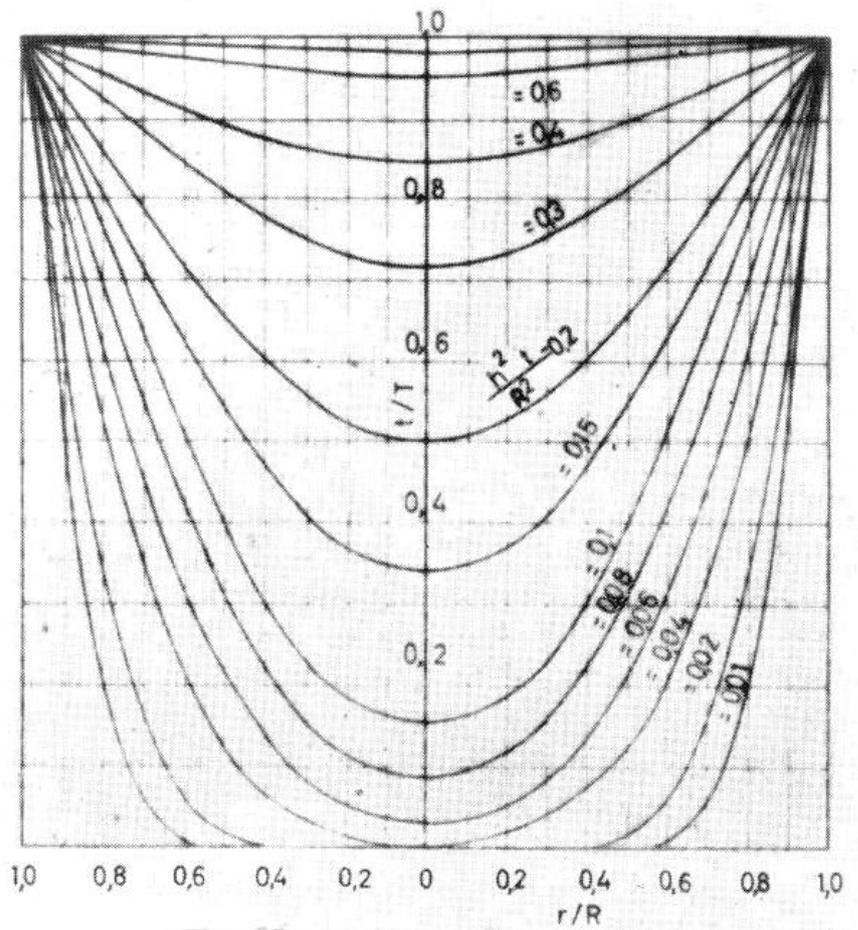
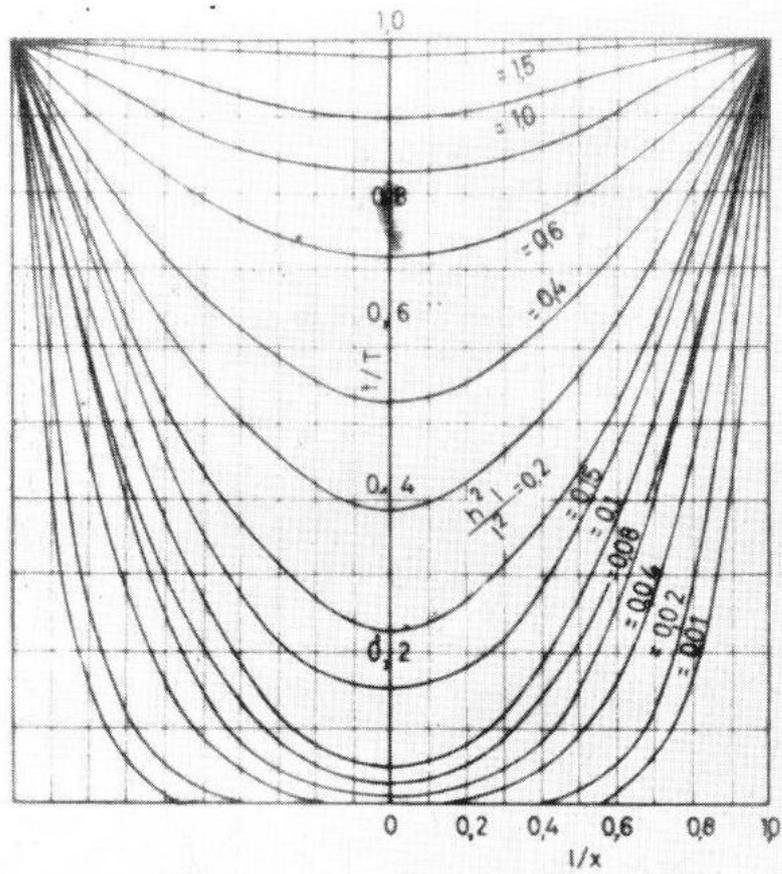


Fig. 6

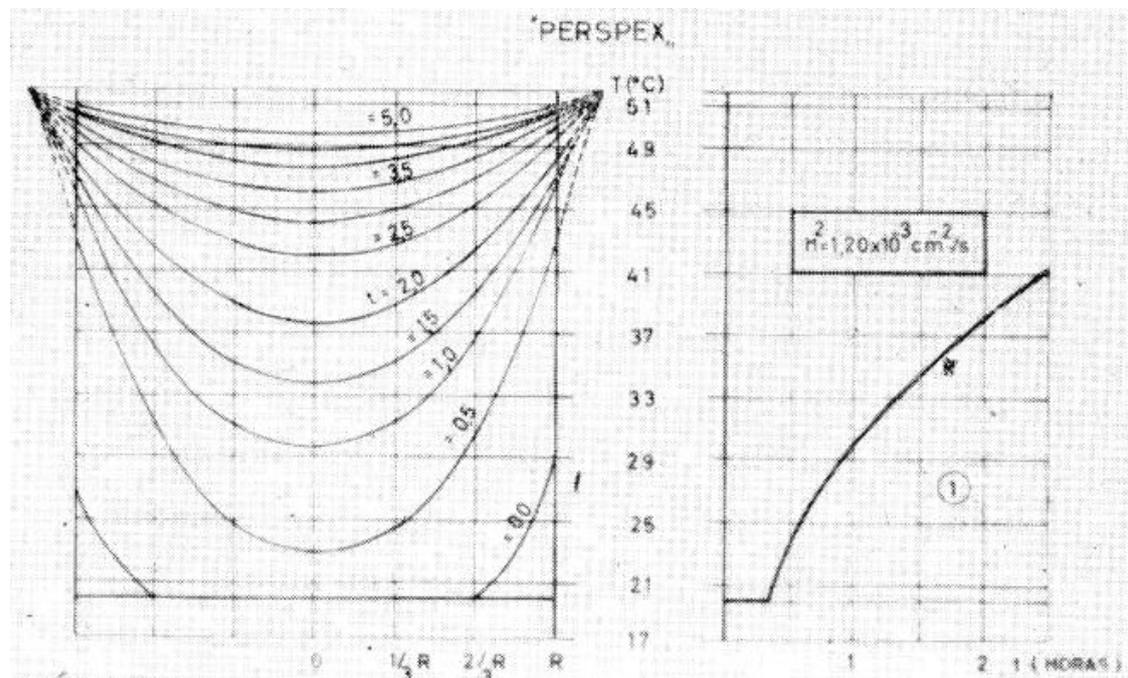
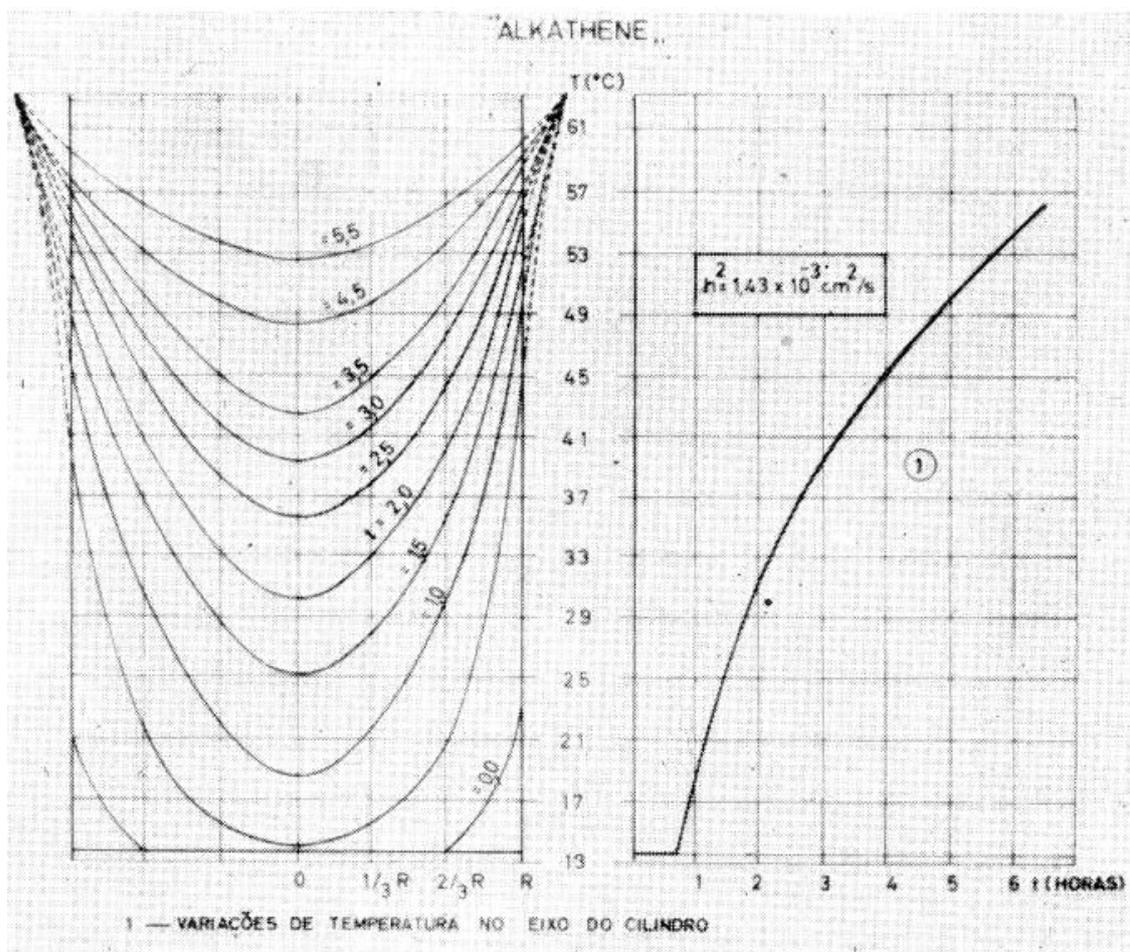
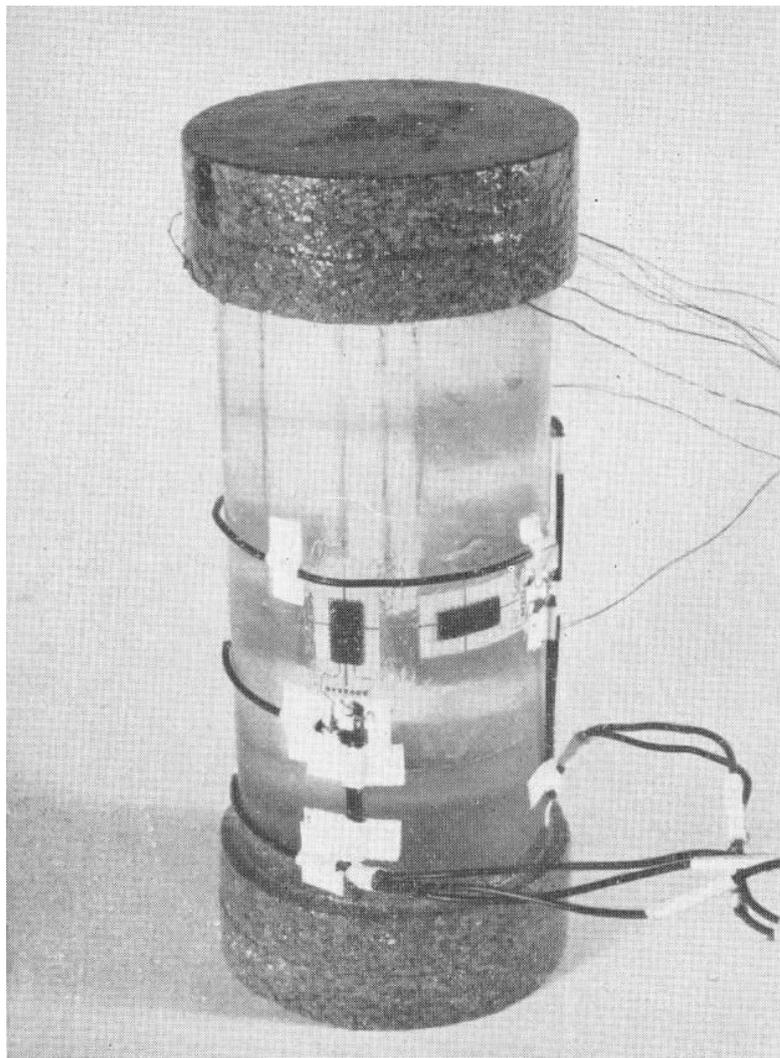
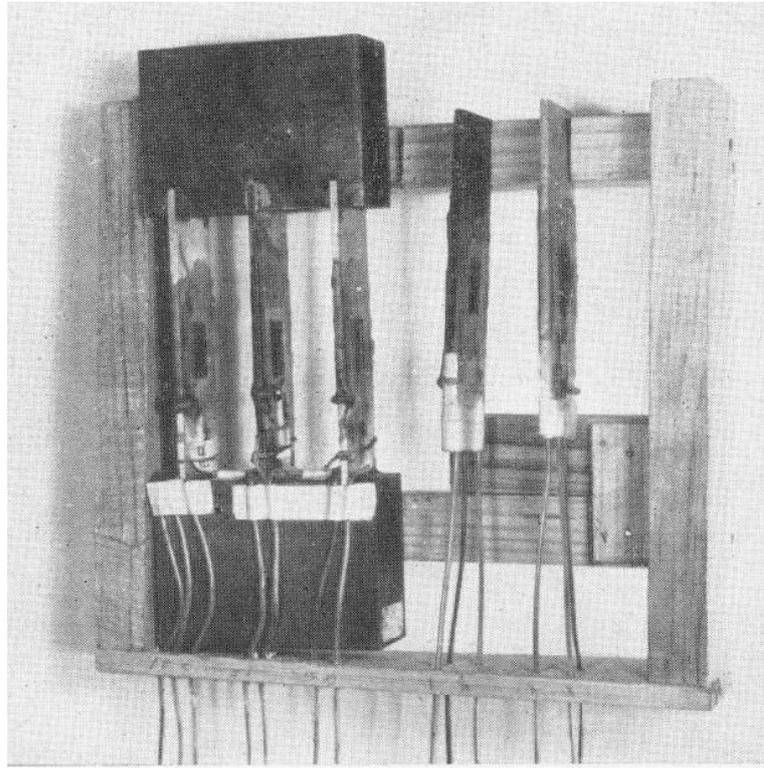


FIG. 7. DIAGRAMAS DE TEMPERATURAS MEDIDAS NUM CILINDRO EM "PERSPEX" E NUM OUTRO EM "ALKATHENE" E DETERMINAÇÃO DA SUA DIFUSIBILIDADE TÉRMICA.

Fig. 7



Figs. 8 e 9

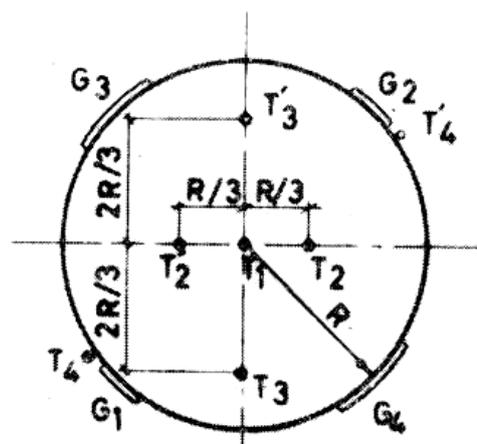
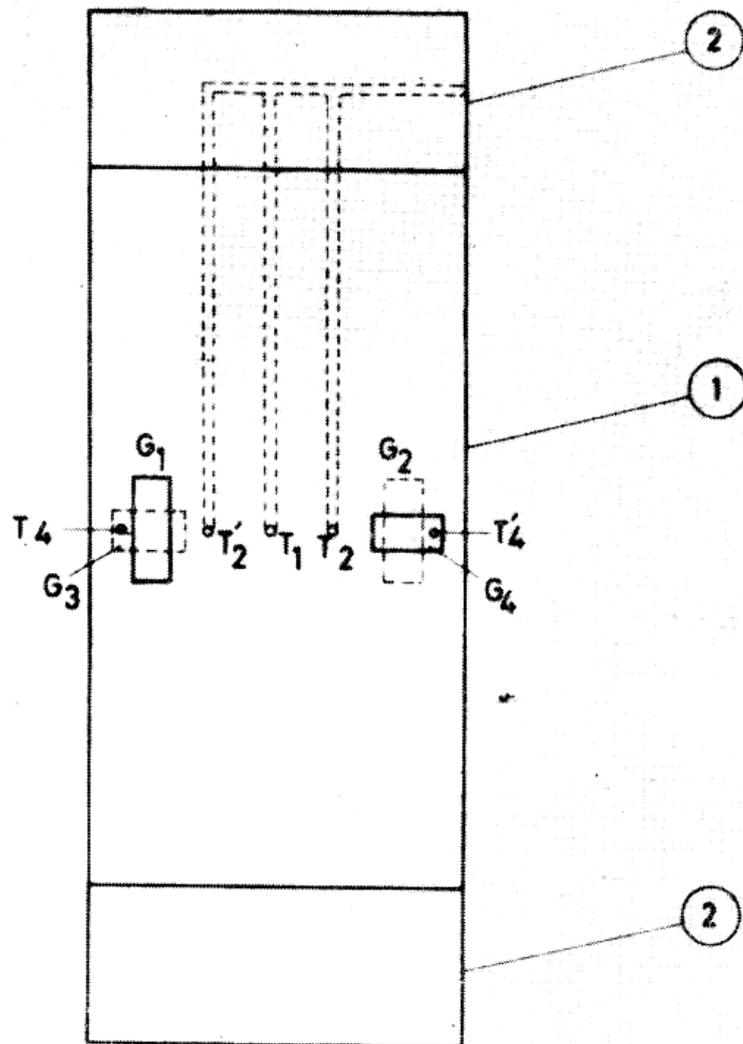


Fig. 10

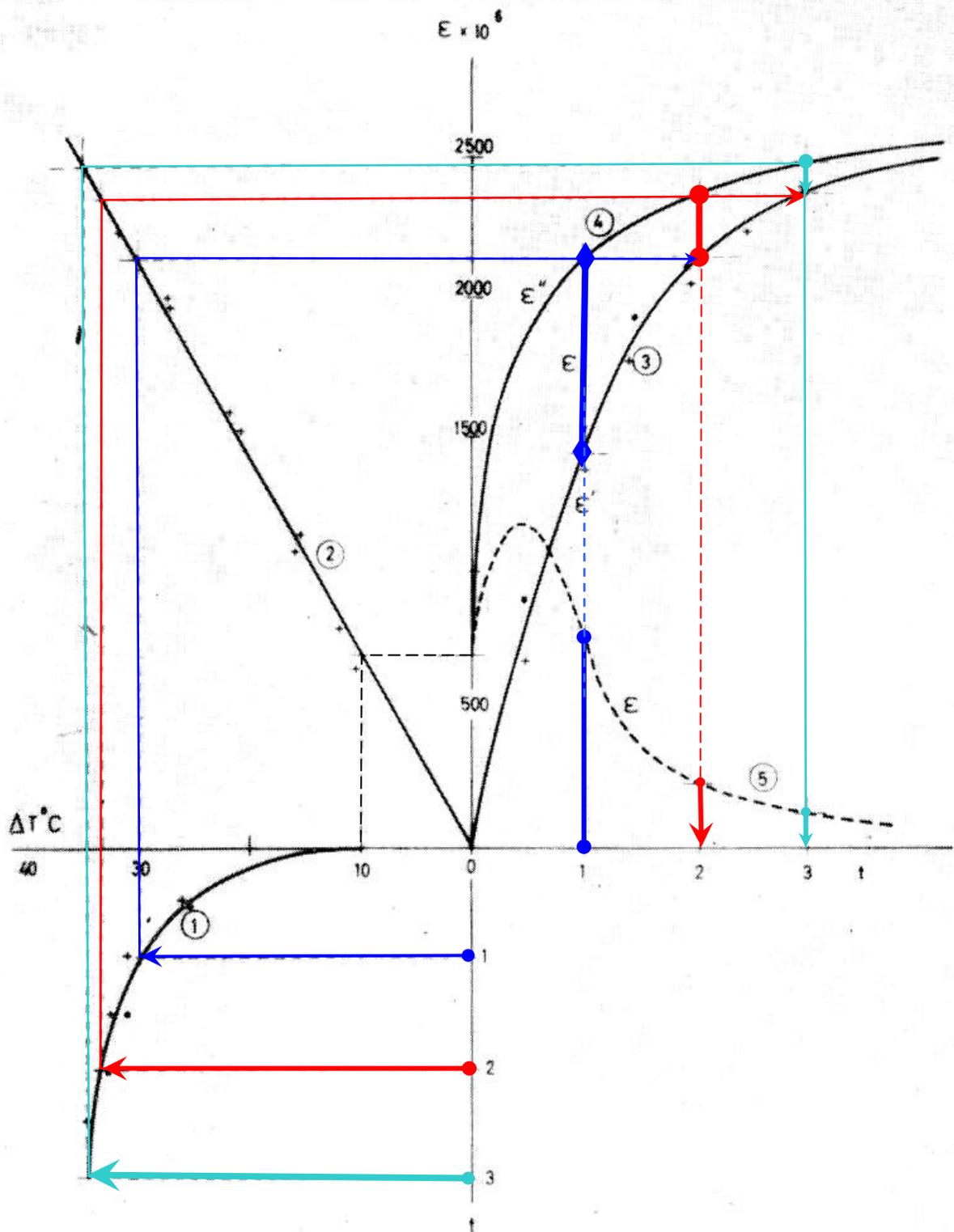


FIG. 11 - TEMPERATURAS E EXTENSÕES NUM CILINDRO DE "PERSPEX "

- 1) VARIACÃO DE TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO CILINDRO EM FUNÇÃO DO TEMPO.
- 2) CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS SR-4, TIPO A5, COLADOS EM "PERSPEX ".
- 3) EXTENSÕES MEDIDAS PELOS EXTENSÓMETROS
- 4) VARIACÕES LIVRES DE COMPRIMENTO QUE EXISTIRIAM À SUPERFÍCIE
- 5) EXTENSÕES PROPORCIONAIS ÀS TENSÕES.

Fig. 11

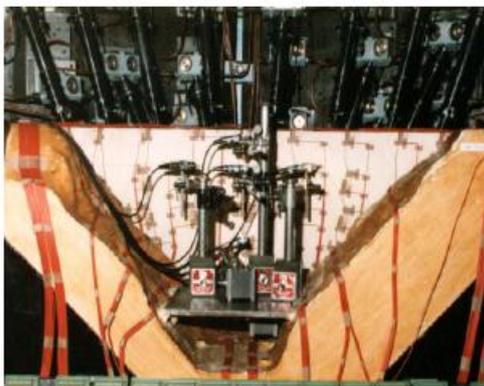
QUADRO III

	T, por ° centígrado			
	Valores obtidos nos ensaios			Valores calculados
	Extensómetro n.º 1	Extensómetro n.º 2	Média	
Alumínio (peça 1)	$- 6,3 \times 10^{-6}$	$- 6,2 \times 10^{-6}$	$- 6,3 \times 10^{-6}$	$- 6,7 \times 10^{-6}$
Aço	$+ 4,8 \times 10^{-6}$	$+ 3,6 \times 10^{-6}$	$+ 4,2 \times 10^{-6}$	$+ 4,8 \times 10^{-6}$
Alumínio (peça 2)	$- 6,5 \times 10^{-6}$	$- 6, \times 010^{-6}$	$- 6,3 \times 10^{-6}$	$- 6,7 \times 10^{-6}$

QUADRO IV

	$\sigma_z \times \left(\frac{1 - \nu}{E} \right)$	
	Valores obtidos nos ensaios	Valores calculados
1 hora	$- 709 \times 10^{-6}$	$- 696 \times 10^{-6}$
2 horas	$- 320 \times 10^{-6}$	$- 334 \times 10^{-5}$
3 horas	$- 112 \times 10^{-6}$	$- 158 \times 10^{-6}$

Barragem do Alto Lindoso (abóbada de dupla curvatura)



a)



b)

Utilização de modelos físicos em estudos de verificação da segurança para cenários de rotura. a) Barragem do Alto Lindoso (decréscimo da resistência); b) barragem do Alqueva (movimento horizontal na falha da fundação) (LNEC - NMMF).

d) *Determinação de tensões de origem térmica em cilindros* — Um cilindro de “perspex”, fig. 9, foi submetido a variações de temperatura correspondentes a uma elevação uniforme da temperatura na superfície lateral. Montaram-se pares termoeletricos na superfície e no interior do cilindro, e colocaram-se na superfície quatro extensômetros SR-4 tipo A5, como mostra a fig. 10. Durante os ensaios do cilindro, foram mantidos a temperatura constante extensômetros compensadores, previamente ensaiados em quartzo fundido para a obtenção do coeficiente de dilatação térmica do material do cilindro.

A fig. 11 mostra as curvas que dão o coeficiente de dilatação térmica do “perspex”, e os diagramas de temperaturas e extensões ϵ' e ϵ'' com o tempo para cilindros. O quadro IV indica os valores proporcionais às tensões $\left(\sigma_z - \frac{1-\nu}{E}\right)$ obtidos a partir das extensões medidas, utilizando a seguinte expressão deduzida da teoria da elasticidade¹⁵:

e) *Ensaio de um modelo de microbetão* — Os primeiros ensaios em modelo para a determinação de tensões de origem térmica foram realizados num modelo em microbetão à esca-

la 1/300 de uma grande barragem abóbada. Na fig. 12 podemos ver a fotografia do modelo após a desmoldagem.

Após a secagem do modelo em câmara apropriada procedeu-se ao isolamento da sua fundação por meio de um aglomerado de cortiça a fim de limitar as variações de temperatura unicamente à barragem.

Com vista a uma melhor uniformização da temperatura no paramento de jusante e nos arcos superiores do paramento de montante colaram-se nessas zonas pequenas lâminas de cobre com 0,15 milímetros de espessura. Introduziram-se aperfeiçoamentos no sistema de imposição da temperatura visando obter maiores amplitudes térmicas e uniformidade de condições nos banhos de óleo. Para isso dotaram-se as serpentinas com alhetas de cobre, diminuiu-se o volume de óleo dos banhos e colocaram-se agitadores de hélice a fim de forçar o óleo da superfície mais aquecido a descer até à zona inferior da barragem. A fig. 13 mostra a montagem da serpentina de jusante com os agitadores de hélice.

A circulação da água quente e da água fria, mantida por meio de bombas, fazia-se

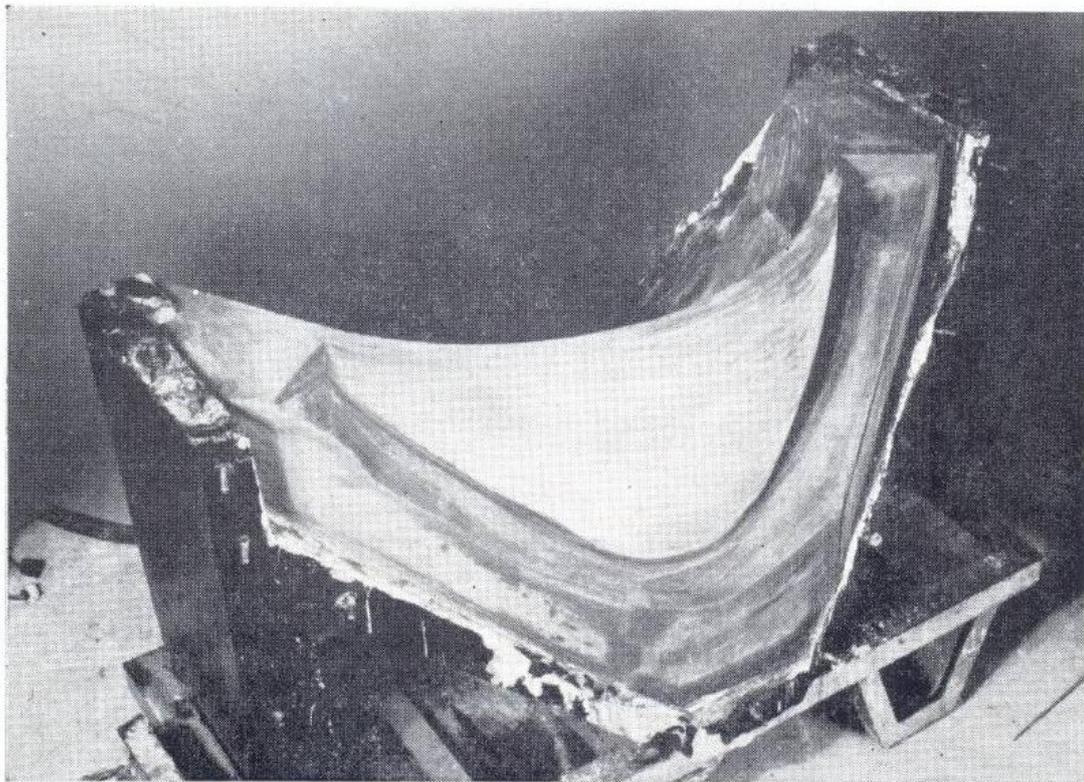


Fig. 12

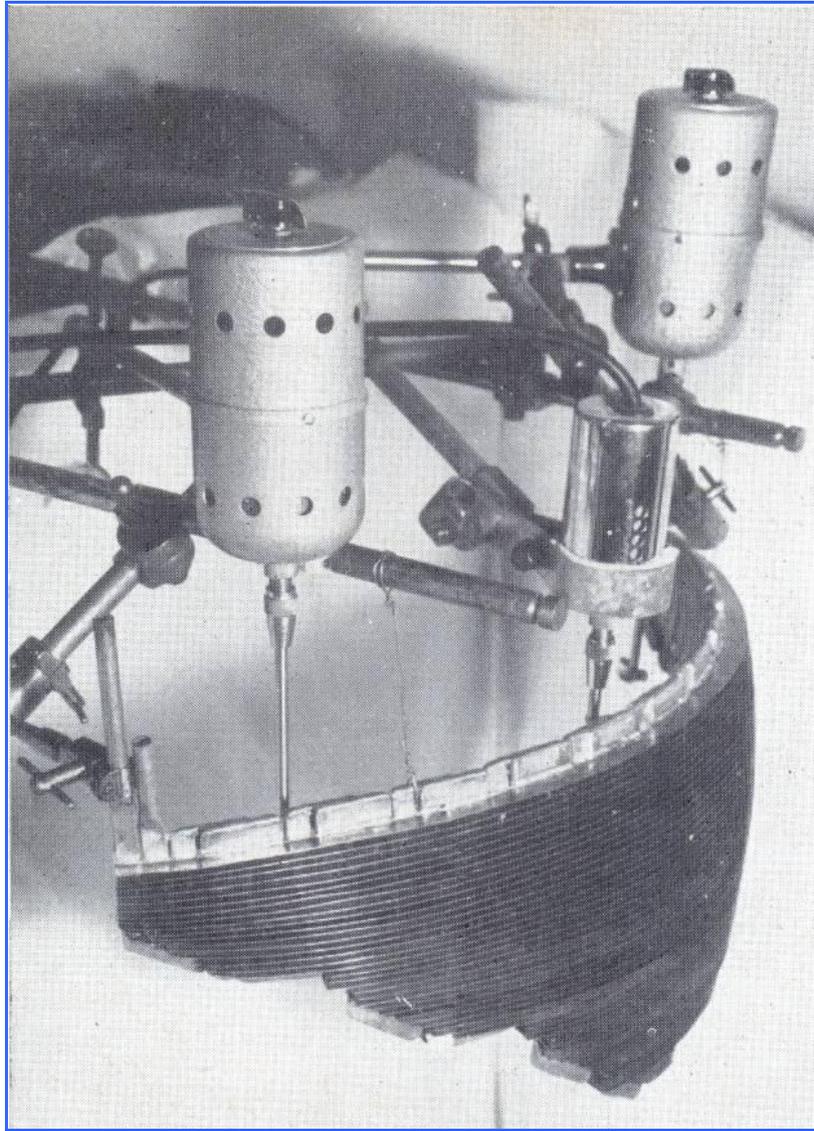


Fig. 13

em dois sentidos opostos nos dois circuitos independentes de cada serpentina obtendo-se assim condições uniformes de um lado ao outro do modelo. A temperatura da água de circulação era regulada por termostatos.

As extensões e temperaturas nos vários pontos dos paramentos foram medidas respectivamente por meio de extensômetros e pares termo-elétricos colados ao modelo segundo o plano de colocação da fig. 14. O ensaio foi realizado para uma variação de temperatura no modelo correspondente à onda anual tendo-se registado as extensões em 5 pontos e a temperatura média da zona central do paramento de jusante num aparelho Brush de registo simultâneo em 6 canais e as tempe-

raturas em 18 pontos dos dois paramentos do modelo num registador Honeywell. A fig. 15 mostra-nos o modelo durante o ensaio. Na fig. 16 podemos ver em pormenor a aparelhagem de registo utilizada. Finalmente na fig. 17 apresenta-se o gráfico das extensões em 10 pontos convenientemente assinalados para uma variação de temperatura cujo diagrama se apresenta do mesmo modo na figura.

f) *Construção de modelos de barragens* — Construiu-se, à escala 1/500, um modelo em “perspex” de uma grande barragem abóbada. Este material apresenta boas características térmicas e elásticas para o estudo que se está a realizar. Na fig. 18 apresenta-se uma fotografia do modelo já concluído.

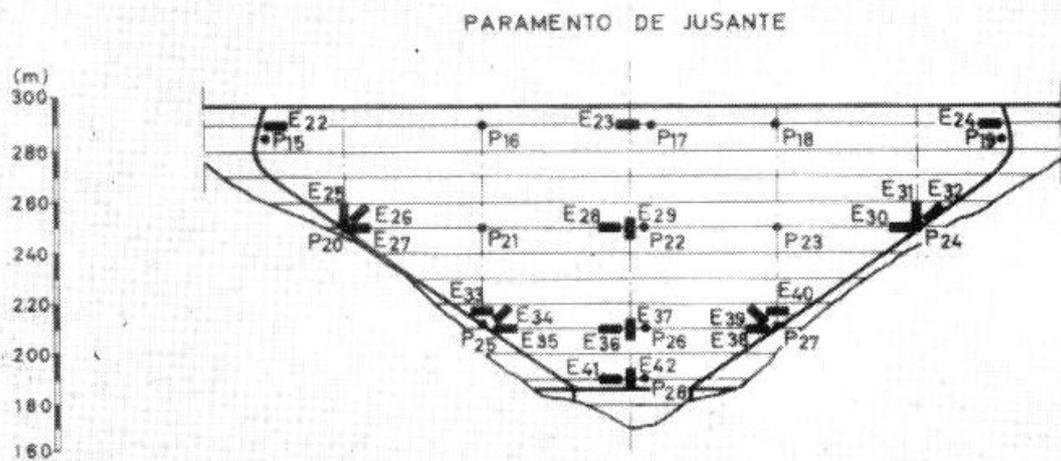
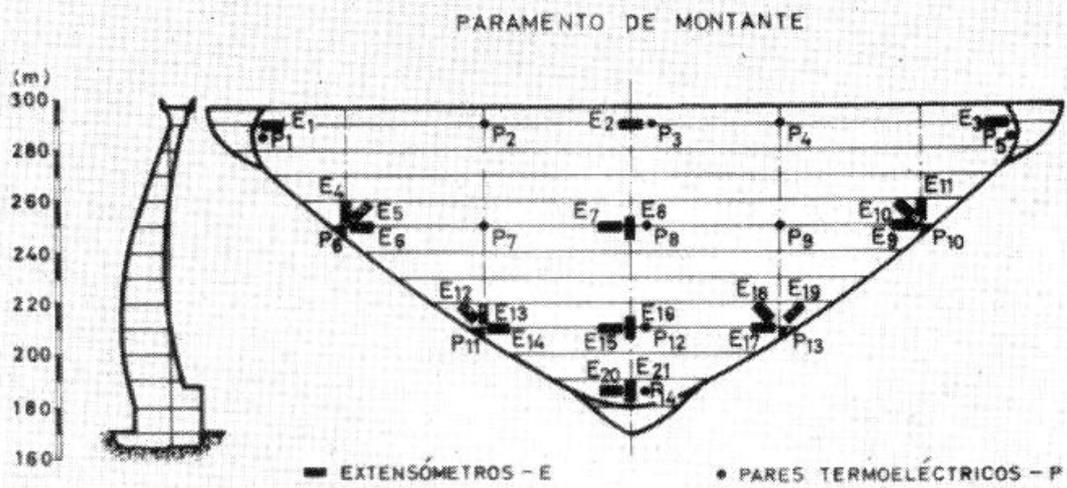
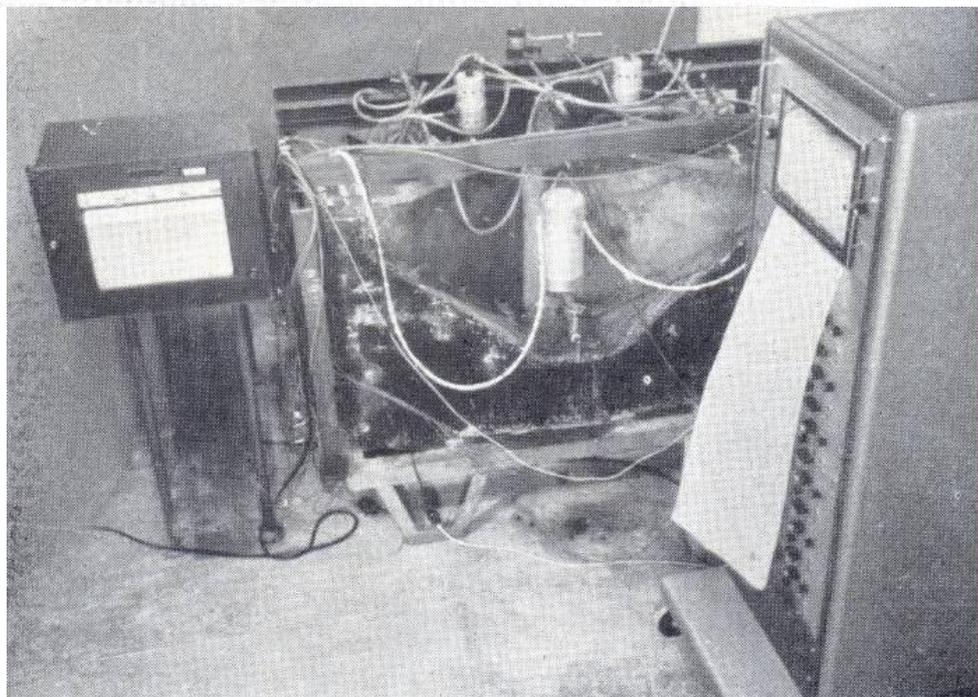


FIG. 14 - PLANO DE COLOCAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS E DOS PARES TERMOELÉTRICOS



Figs. 14 e 15

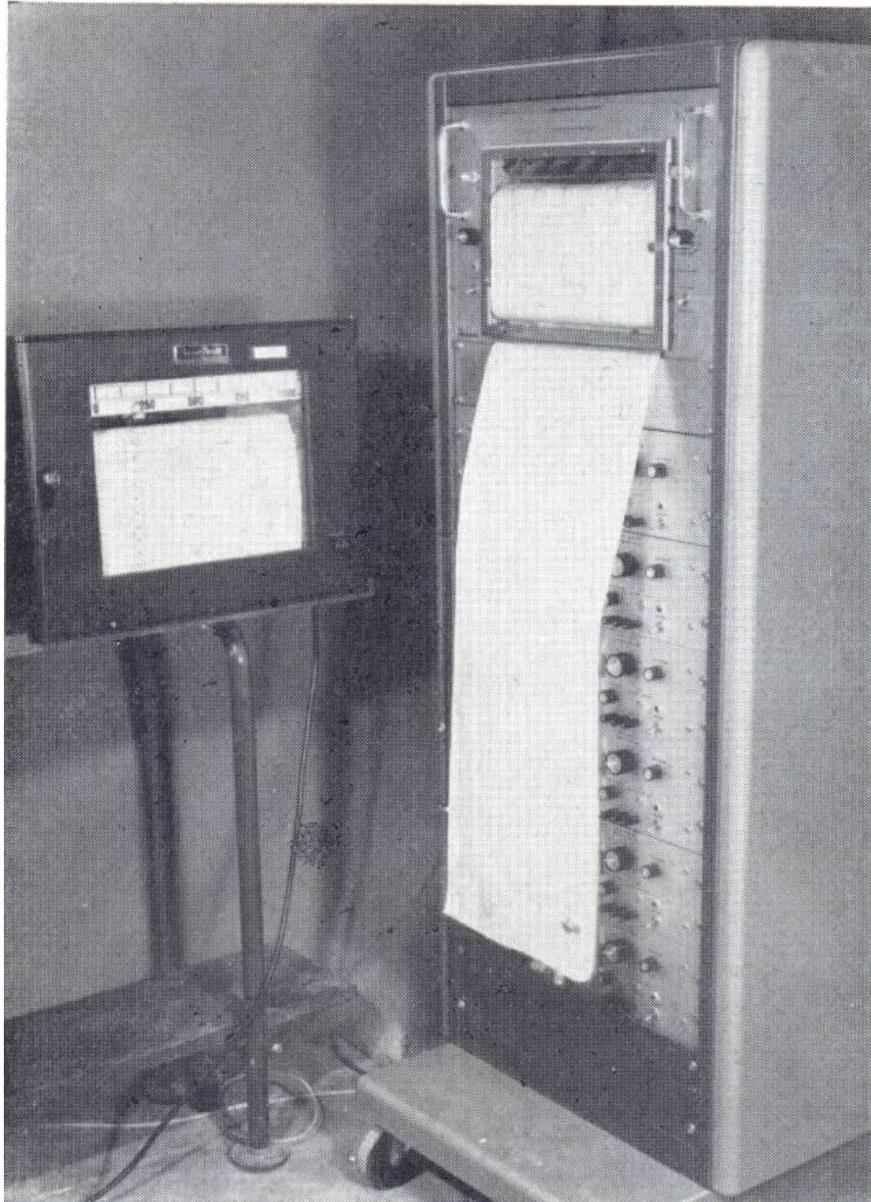


Fig. 16

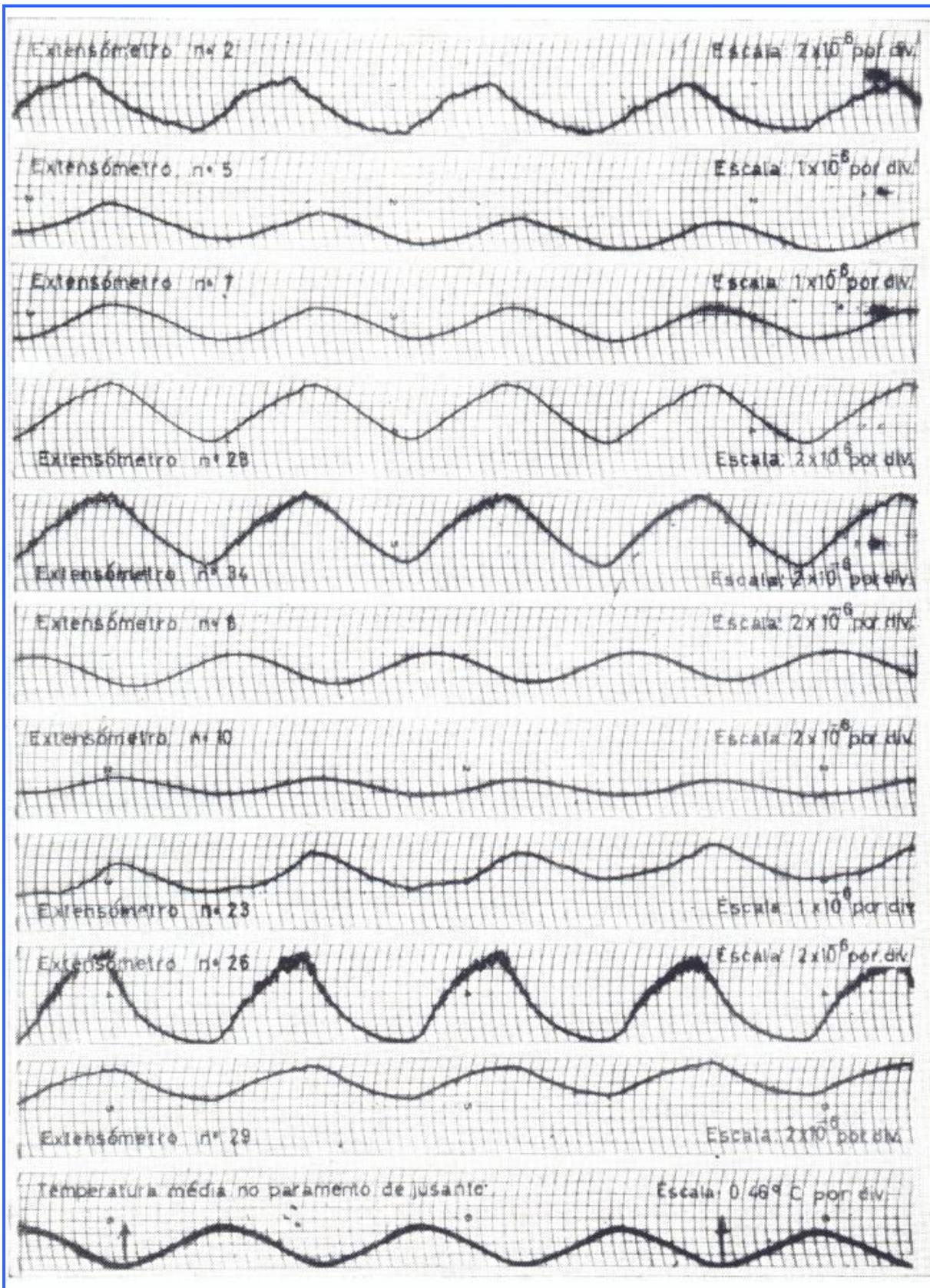


Fig. 17

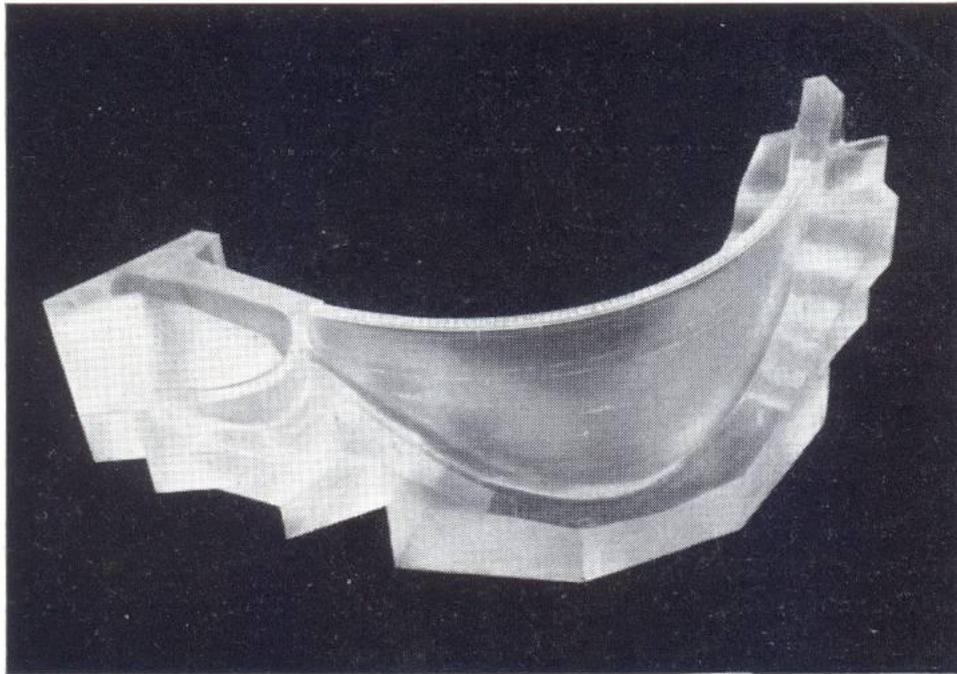


Fig. 18

Agradecimentos

Este programa de estudos está a ser levado a cabo no LNEC sob o patrocínio do Ministério do Ultramar, da Direção Geral dos Serviços Hidráulicos e das empresas Hidro-Eléctrica do Zêzere, Hidro-Eléctrica do Douro, Hidro-Eléctrica do Cávado e Hidro-Eléctrica do Alto Alentejo.

Colaboraram no presente trabalho os engenheiros assistentes A.A. Cruz e A.S. Cobeira, da Secção de Barragens.

RESUMO

Da observação das barragens de betão conclui-se que as tensões provocadas pela variação do estado térmico são muito importantes. Todavia os métodos analíticos quando aplicados ao cálculo destas tensões não dão resultados satisfatórios.

Pode-se decompor o estado térmico no contorno de uma barragem numa onda anual, uma onda quinzenal e uma onda diária de temperatura, nos efeitos da radiação solar e

da exposição para as superfícies em contacto com o ar e uma onda anual para a água da albufeira até uma certa profundidade.

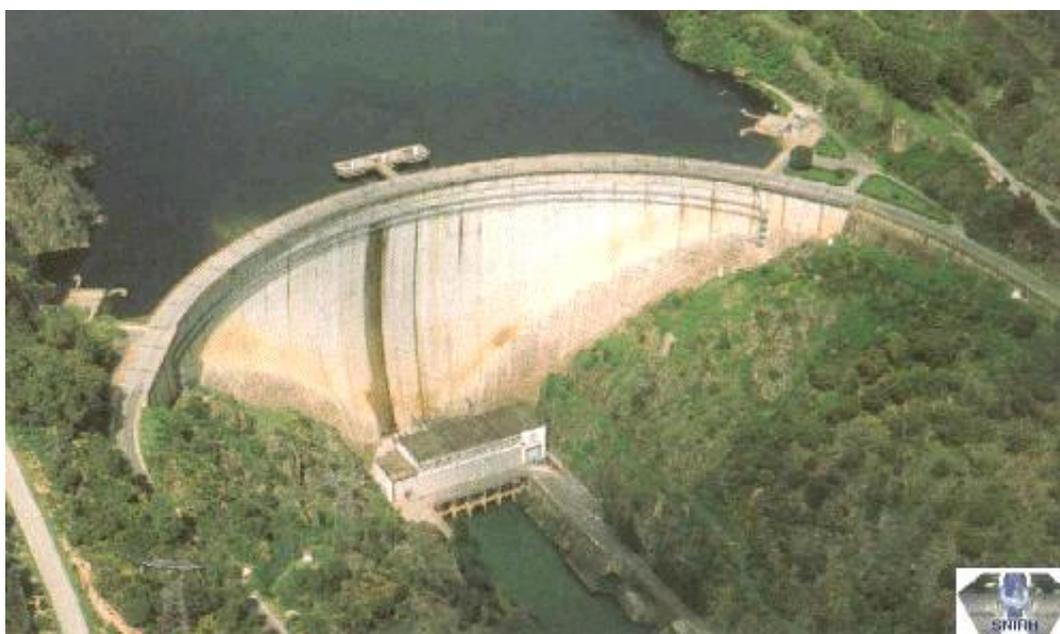
O Laboratório Nacional de Engenharia Civil iniciou um programa de investigação para a determinação, por meio de modelos, de tensões de origem térmica em barragens de betão. A análise das condições de semelhança a que os modelos devem obedecer mostram que o microbetão, o "perspex" e o brnze são os materiais mais adequados para os modelos.

Após a introdução de melhoramentos sucessivos no sistema de imposição de variações de temperatura, sugeridos pela experiência, realizaram-se ensaios num modelo de microbetão de uma barragem abóbada para a determinação do estado de tensão provocado pela onda anual de temperatura. Empregou-se, nestes ensaios, equipamento de registo de extensões e temperaturas de elevada precisão. Em breve, realizar-se-ão ensaios idênticos num modelo de "perspex" de uma outra barragem abóbada, que está presentemente a ser montado.

INDICE DE FIGURAS

- Fig. 1 — Esquema da circulação da água nas serpentinas
- a) Corte
 1. Serpentinas de jusante
 2. Serpentinas de montante
 3. Banho de óleo
 4. Isolamento
 - b) Esquema das serpentinas de jusante
 - c) Esquema das serpentinas de montante
- Fig. 2 — Ensaios preliminares de temperaturas num modelo
- Fig. 3 — Ensaios de dilatação térmica de metais
1. Provete nº 1
 2. Provete nº 2
- Fig. 4 — Ensaios de dilatação térmica do “perspex”
- Fig. 5 — Ensaios de dilatação térmica em provetes de microbetão
- Fig. 6 — Diagramas teóricas de temperatura numa placa e num cilindro
- Fig. 7 — Diagramas de temperaturas medidas num cilindro em “perspex” e num outro em “alkathène” e determinação da sua difusibilidade térmica
- (1) Variação de temperatura no eixo do cilindro
- Fig. 8 — Ensaios de determinação de tensões de origem térmica em metais
- Fig. 9 — Cilindro de “perspex” para determinação de tensões de origem térmica
- Fig. 10 — Pontos de leitura de extensões e temperaturas
1. Cilindro de “perspex”
 2. Isolamento de cortiça
 - G. Extensômetros elétricos
 - T. Pares termoelétricos
- Fig. 11 — Temperaturas e extensões num cilindro de “perspex”
- (1) Variação de temperatura na superfície do cilindros em função do tempo
 - (2) Curvas de calibração dos extensômetros SR-4, tipo A5, colados em “perspex”
 - (3) Extensões medidas pelos extensômetros
 - (4) Variações livres de comprimento que existiriam à superfície
 - (5) Extensões proporcionais às tensões
- Fig. 12 — Modelo em microbetão de uma barragem abóbada para determinação de tensões de origem térmica
- Fig. 13 — Serpentina de jusante
- Fig. 14 — Plano de colocação dos extensômetros e dos pares termoelétricos
- Fig. 15 — Ensaios num modelo de microbetão de uma barragem abóbada
- Fig. 16 — Aparelhagem de registo em ensaio
- Fig. 17 — Diagramas das extensões e temperaturas
- Fig. 18 — Modelo em “perspex” de uma barragem abóbada

Barragem do Cabril / Portugal - 1954



A barragem de Cabril foi uma das primeiras barragens de abóbada a ser construída em Portugal. O projeto foi feito com base em resultados de modelos reduzidos experimentais. Foi inaugurada em 1954.