



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

Nas décadas de 50 e 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.

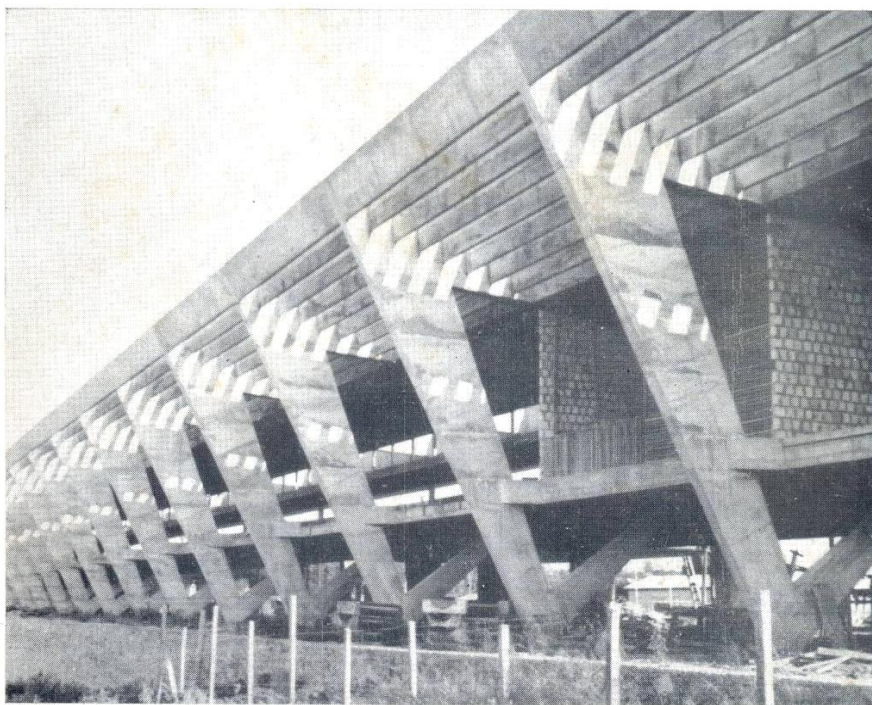
Ver, a seguir, nos artigos publicados na revista ESTRUTURA, os conceitos usados na década de 60 no projeto da barragem do Funil / RJ.

Foram adicionadas algumas fotos da barragem de Funil para ilustrar o texto.

# ESTRUTURA

REVISTA TÉCNICA

DAS CONSTRUÇÕES



CURSO DE CONCRETO PROTENDIDO  
BARRAGENS — ARCO PORTUGUÊSAS  
CASOS ESPECIAIS DE LAJES RETANGULARES  
TEORIA DAS PLACAS  
CASCAS CILÍNDRICAS  
CÁLCULO COMPLETO DE UM EDIFÍCIO



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 <sup>(1)</sup>, J. LAGINHA SERAFIM <sup>(2)</sup> E A. F. DA SILVEIRA <sup>(3)</sup>

*Tradução de uma comunicação apresentada ao Simpósio sobre Barragens arco, organizado pela American Society of Civil Engineers, em Knoxville, Ten., em Junho de 1956 e publicada no Journal of the Power Division (Proc. A.S.C.E.), N° 3, Junho de 1956*

## SUMÁRIO

A falta de combustíveis minerais em Portugal deu origem a um programa de aproveitamento dos recursos hidroelétricos do país que se concretizou na construção de um certo número de barragens de betão de grandes dimensões. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil foi chamado a colaborar muito ativamente nesse programa tendo levado a cabo numerosos ensaios sobre modelos de barragens, assim como os ensaios da rocha de fundação dessas barragens e a observação do seu comportamento estrutural.

No trabalho apresentam-se vários resultados dos ensaios das rochas de fundação, dos ensaios sobre modelo e da observação das barragens de Castelo do Bode, Venda Nova, Cabril, Salamonde, Caniçada e Bouçã. Não se descrevem as várias técnicas de ensaios e observações usadas, apresentando-se quase exclusivamente, resultados.

Dado que as barragens ensaiadas e observadas são do tipo abóbada as conclusões de trabalho dizem respeito unicamente a este tipo de barra-

## SUMMARY

The lack of mineral fuel in Portugal, has led to a program for putting into use the hydroelectric resources of the country. This program required the construction of a number of large concrete dams. For that purpose, a close co-operation was requested to the Laboratório Nacional de Engenharia Civil, that has carried out several model tests of dams and tests on their foundation rocks and has observed their structural behaviour.

This paper presents some results of the tests on the foundation rocks, of the model tests and of the observation of Castelo do Bode, Venda Nova, Cabril, Salamonde, Caniçada and Bouçã dams. The different techniques used in the tests and observations are not described, and paper comprises almost exclusively results. The dams tested and observed being of the arch dam type, the conclusions drawn from the paper apply solely to this kind of structures. As a rule it is concluded that the safety conditions and economy of this type of dam are excellent,

(\*) Director Interino do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

(\*\*) Engenheiro Investigador, Chefe da Secção de Barragens

(\*\*\*) Engenheiro Assistente da Secção de Barragens



gens. Duma maneira geral conclue-se pela excelência das condições de segurança e da economia das barragens abóbada mesmo quando o terreno de fundação é muito deformável. Outra conclusão diz respeito à aptidão dos modelos para a determinação das tensões devidas à pressão hidrostática quando há formas complicadas ou singularidades de barragem e heterogeneidades da fundação. Pelo que se refere à observação do comportamento das barragens, a par do contróle da sua segurança, mostra ela a marcada influência dos movimentos das fundações e encontros artificiais e das variações de temperatura, quer devidas à libertação do calor de prêsã, quer as condições climáticas do local.

Em todos os casos em que foi possível fazer uma separação dos efeitos das várias solicitações verificou-se uma concordância notável entre os resultados dos ensaios sôbre modelo e os resultados da observação do protótipo.

## I — INTRODUÇÃO

A falta de combustíveis minerais em Portugal levou a empreender, a partir de 1946, a realização de um extenso programa de aproveitamentos hidroelétricos. Em virtude de o regime hidrológico dos rios ser caracterizado por grandes caudais de cheia no inverno e caudais muito reduzidos no verão foi necessário criar grandes albufeiras à custa de barragens de grande altura.

Como até agora foi possível encontrar, em quase todos os casos, vales estreitos, i.e., em que a relação corda-altura não tem ultrapassado o valor de 4 e como na grande maioria desses locais existem rochas de qualidade satisfatória, têm sido construídas principalmente barragens arco. A inquestionável segurança e economia deste tipo de barragens também tem contribuído

even when the foundation soil is very deformable. Another conclusion concerns the adequacy of models to determine the stresses due to the hydrostatic pressure when complicated forms or singularities exist in the dam or the foundations are heterogeneous. In what concerns the observation of the behaviour of the dams, together with the control of their safety, it shows a remarkable influence of the movements of foundations and abutments due to both the dissipation of hydration heat and local climatic conditions.

Whenever a separation of the effects of the different actions was possible, a remarkable agreement was found between the results of the model tests and the results of the observation of the prototype.

largamente para a sua adoção mesmo em casos em que as condições do local não têm parecido muito propícias.

Os projetos de tôdas as barragens construídas foram acompanhados por estudos sôbre modelos realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e pela observação pormenorizada do seu comportamento. Estes trabalhos permitiram fazer a crítica dos métodos de cálculo de barragens arco e das solicitações a considerar e ainda obter esclarecimentos fundamentais sôbre as formas mais adequadas. Assim, enquanto as duas primeiras barragens arco construídas são do tipo arco-gravidade de paramento de montante cilíndrico, as seguintes são do tipo cúpula, isto é, com curvatura também na vertical e arcos de raio variável.



## II — CARACTERÍSTICAS DAS BARRAGENS E DAS SUAS FUNDAÇÕES

No presente trabalho descrevem-se alguns dos estudos mais importantes realizados sobre as garragens arco portuguesas construídas depois de 1946, (Fig. 1) cujas principais características se apresentam no Quadro I.

Na construção dessas barragens foram usados cimentos portugueses do tipo semelhante ao tipo II das normas A. S. T. M. e betões com inertes de dimensão máxima de 15 cm. Foram construídas por blocos separados por juntas radiais distando no máximo de 15 m. O betão foi colocado por camadas de 1,5 m ou 2 m com um espaçamento entre betonagens de 4 a 5 dias e foram usados vibradores de alta frequência na compactação do betão. Apenas nas barragens de Castelo do Bode e, do Cabril foi usada água arrefecida e gelo na amassadura do betão. Não foi feito arrefecimento artificial do betão de qualquer das barragens.

As características das fundações foram objeto de reconhecimentos geológicos e de prospeções por sondagens e galerias. Porém, dada a importância que apresenta no comportamento das barragens arco a deformabilidade das fundações reconheceu-se desde início a necessidade da sua determinação, tanto por ensaios em laboratório como por ensaios nos locais. Os ensaios de laboratório consistiram na determinação de módulos de elasticidade de carotes extraídas dos vários furos, depois de feita uma escolha criteriosa, e também de prismas extraídos das galerias. Os ensaios "in situ" foram realizados em todas as fundações das barragens aqui referidas com exceção de Venda Nova. As técnicas usadas nestes ensaios e os resultados obtidos foram já descritos. Um dos métodos usados constitui em carregar com água sob pressão um troço de uma galeria

circular e em medir as variações dos diâmetros. O outro método constitui na carga simultânea de duas superfícies planas circulares opostas numa seção de uma galeria por meio de macacos e almofadas metálicas cheias de óleo para uniformização da carga sobre a rocha. Tais ensaios foram em grande número de casos realizados antes e depois da injeção das rochas à volta das galerias.

No Quadro II indicam-se as características das fundações das barragens descritas neste trabalho e os valores, e dos módulos de elasticidade da rocha ao longo do vale deduzidos de todos os ensaios realizados. Indica-se também o tipo e número de ensaios realizados.

## III — DIMENSIONAMENTO DAS BARRAGENS ARCO. ENSAIOS DE MODELOS

Baseando-se os critérios de dimensionamento atuais nos valores das tensões produzidas pelas solicitações, há que buscar, sobretudo para as estruturas de grande responsabilidade e custo, métodos que forneçam com boa garantia de precisão os valores dessas tensões.

Quando se iniciou em Portugal a construção das grandes barragens arco já se tinha também alguma experiência dos estudos sobre modelo colhida dos ensaios do modelo da barragem de Santa Luzia<sub>2</sub>. Uma crítica, que então se pode começar, dos métodos de cálculo de barragens mais empregados revelou ou a insuficiência desses métodos ou a sua grande complexidade. Concluiu-se que, dentre os existentes, o método "trial load" era o que poderia fornecer resultados de maior confiança, ainda que a sua aplicação na forma mais completa, isto é, com ajustamentos radiais, tangenciais e de torção fosse demasiado trabalhosa e demorada.



Em princípio este método pôde aplicar-se a barragens de betão de forma qualquer e ter em conta a verdadeira deformabilidade da rocha de fundação. No entanto, quando o vale é acentuadamente assimétrico ou o perfil da fundação irregular, quando a barragem apresenta encontros de gravidade importantes ou grandes aberturas — por exemplo para os evacuadores de cheias — ou ainda quando as fundações são heterogêneas então o número de arcos e consolas que será necessário considerar, assim como o número de tentativas e reiteraões dos ajustamentos, conduzem a um trabalho e a um prazo inoportáveis.

Além disso, sempre que as hipóteses da Resistência de Materiais não são aplicáveis como acontece nos campos de tensões que existem nas regiões de formas muito irregulares, o método, pela sua própria natureza, não pode dar resultados satisfatórios.

De qualquer modo o método foi aplicado a todas as barragens a que se refere este trabalho, mas na sua forma simplificada, isto é, apenas com ajustamentos radiais dos deslocamentos dos arcos e das consolas. As comparações que foram sendo feitas entre os resultados dados por este método simplificado e os resultados dos modelos e da observação, conduziram à conclusão que ele apenas pode servir para uma estimativa de ante-projeto dos valores das tensões. Em regra, para o caso de formas regulares, as tensões nos arcos determinadas deste modo são de 10 a 20% mais elevadas e as tensões na base das consolas chegam a ser muito maiores do que as dadas pelos modelos. Deve contudo notar-se que as tensões máximas de compressão dadas pelo cálculo e pelos modelos, ainda que sendo da mesma ordem de grandeza não se observam nos mesmos pontos. Os deslocamentos radiais — os únicos que são determinados pelo cál-

culo — são também de cerca de 10 a 20% mais altos que os dos modelos.

Este panorama levou então a considerar como base do dimensionamento e do projeto das barragens portuguesas os resultados dos ensaios de modelos. Com efeito, a melhoria das técnicas de ensaio permitiu não só obter total confiança no rigor do método experimental mas também tornar os prazos de ensaio menores que os prazos de cálculo pelo método "trial load" simplificado. Deste modo, na maioria das barragens a escolha final das dimensões foi baseada no estudo de sucessivos modelos nos quais se foram aperfeiçoando as formas. Tais estudos têm sido iniciados logo que existe um ante-projeto da estrutura. As técnicas de ensaio atualmente usadas já foram descritas<sup>3,4</sup> e o Quadro III indica o número e as características dos modelos, a duração dos ensaios e o custo dos ensaios dos modelos.

Com se depreende deste Quadro, faz parte da técnica atual o ensaio simultâneo de dois modelos iguais para cada forma de barragem analisada. Deste modo aumenta-se a confiança nos resultados e melhora-se a precisão tomando as médias dos valores obtidos sobre os dois modelos.

Nos estudos em modelo admite-se, como nos cálculos, que a barragem é um sólido homogêneo, isotrópico, elástico e contínuo apoiado sobre fundação elástica.

Normalmente apenas se analisam os modelos para a ação da pressão hidrostática, mas em certos casos foram também determinadas as tensões devidas ao peso próprio. Porém, em geral calculam-se as tensões devidas a esta solicitação, suponho a barragem construída por blocos isolados. Os efeitos das restantes solicitações como a temperatura, os tremores de terra, ou a subpressão são também calculados analiticamente e adicionados às ten-

sões devidas à pressão hidrostática. Deve notar-se que, dentro das condições habituais de cálculo, as tensões devidas à pressão hidrostática são muito mais importantes que as tensões devidas ao conjunto das outras sollicitações.

As tensões nos modelos são determinadas por meio de extensômetros elétricos, tendo-se usado especialmente os extensômetros SR-4 Baldwin dos tipos A-7 e A-8. Prêviamente determinam-se sempre também com vernizes frágeis, as isostáticas dos dois paramentos. São também medidos os deslocamentos radiais, tangenciais e verticais e as rotações. Tais grandezas são quase sempre determinadas para vários níveis da água da albufeira, o que é principalmente importante para comparação com observações sôbre o protótipo. Êste fato representa mais uma das vantagens dos modelos em relação aos cálculos.

Recentemente foi estudado um método experimental suplementar para investigar melhores formas de barragens arco. Consiste em determinar as formas que toma uma membrana fixada através de um vale que é carregada de jusante com água e com fôrças verticais ascendentes proporcionais ao pêso do betão.

#### IV — INTERESSE DA OBSERVAÇÃO

A observação das barragens quer durante, quer depois da construção preenche duas finalidades principais — o controle da segurança e a investigação do comportamento.

A observação pode controlar os métodos de projeto, analíticos ou experimentais e julgar os métodos de construção seguidos.

No entanto, para que tal esforço seja proveitoso é essencial que a aparelhagem seja perfeitamente adequada ao fim em vista e por outro lado que

todo o trabalho de colocação, leitura da aparelhagem, cálculo e interpretação das medições seja levada a cabo por equipes de especialistas perfeitamente treinados apoiados num laboratório onde os vários ensaios, quer de aparelhagem, quer de materiais sejam levados a cabo.

Ao comparar porém, para efeitos de interpretação, os resultados da observação de uma obra com os resultados de ensaios em modelos, surge uma dificuldade resultante de o protótipo estar sujeito a muitas ações que não são reproduzíveis em modelo com facilidade, como sejam a variação de temperatura resultante quer das variações exteriores quer do desenvolvimento e dissipação do calor de hidratação de cimento, a anelasticidade do betão e da rocha, fecho das juntas, eventuais assentamentos das fundações, movimentos das margens da albufeira, etc., etc.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil conduz <sup>5,6</sup> todo o trabalho de observação no qual colaboram em regra outros departamentos do Estado e os concessionários das obras. O plano detalhado da observação é elaborado pelo L.N.E.C. que, durante a construção, mantém uma equipe na obra que procede à colocação da aparelhagem e sua leitura. As leituras são enviadas regularmente ao Laboratório onde os valores recebidos são calculados, passados a diagramas e interpretados, o que exige numerosos ensaios do betão.

As grandezas que até agora têm sido observadas são: deslocamentos absolutos de pontos da barragem e do terreno pelos métodos geodésico e dos alinhamentos;<sup>7</sup> deslocamentos verticais por nivelamentos de precisão do coroamento da barragem e de pontos do terreno a jusante<sup>8</sup>; deslocamentos relativos com pêndulos<sup>9</sup>; rotações com clinômetros; movimentos de juntas no



**QUADRO I**  
**CARACTERISTICAS DAS PRINCIPAIS BARRAGENS-ARCO PORTUGUESAS**

Barragens Empresa Concessionária	Tipo	Altura	Espessura na base	Raio de montante no coroa- mento	Angulo ao centro (graus)	Volume de concreto	Período de Construção		Projeto
							Comêço da concreta- gem	Conclusão	
Castelo do Bode (Hidro-Elétrica do Zêzere).	AG, r.c.	115	34	150	112°	450.000	Jun. 48	Agos. 50	A. Coyne
Venda Nova (Hidro-Elétrica do Cávado)	AG, r.c.	97	33	154,5	95°	220.000	Out. 49	Mai 51	A. Coyne
Cabril (Hidro-Elétrica do Zêzere).	A, r.v.	135	19	155	110°	360.000	Jun. 52	Dez. 53	Empresa
Salamonde (Hidro-Elétrica do Cávado)	A, r.v.	75	8	115	100°	93.000	Abr. 52	Abr. 53	A. Coyne
Caniçada (Hidro-Elétrica do Cávado)	A, r.v.	76	8	105	107°	80.000	Jul. 53	Agos. 54	Empresa
Bouçã (Hidro-Elétrica do Zêzere).	A, r.v.	60	7,5	95	102° 50'	35.000	Nov. 54	Agos. 55	Empresa

AG — arco-gravidade; A — arco; r.c. — raio constante; r.v. — raio variável



interior do betão com medidores de juntas, e na superfície com alongâmetros<sup>10</sup>; temperaturas do ar, do betão e da água das albufeiras com termómetros de resistência e com pares termoelectrónicos; extensões com extensómetros<sup>11</sup>; tensões de compressão com

células Carlson; pressões neutras com medidores de humidade e subpressões com tomadas de pressão equipadas com manómetros.

No Quadro IV está indicada a aparelhagem utilizadas nas barragens arco já observadas e em observação.

## V — RESULTADOS DOS ESTUDOS

### BARRAGEM DO CASTELO DO BODE

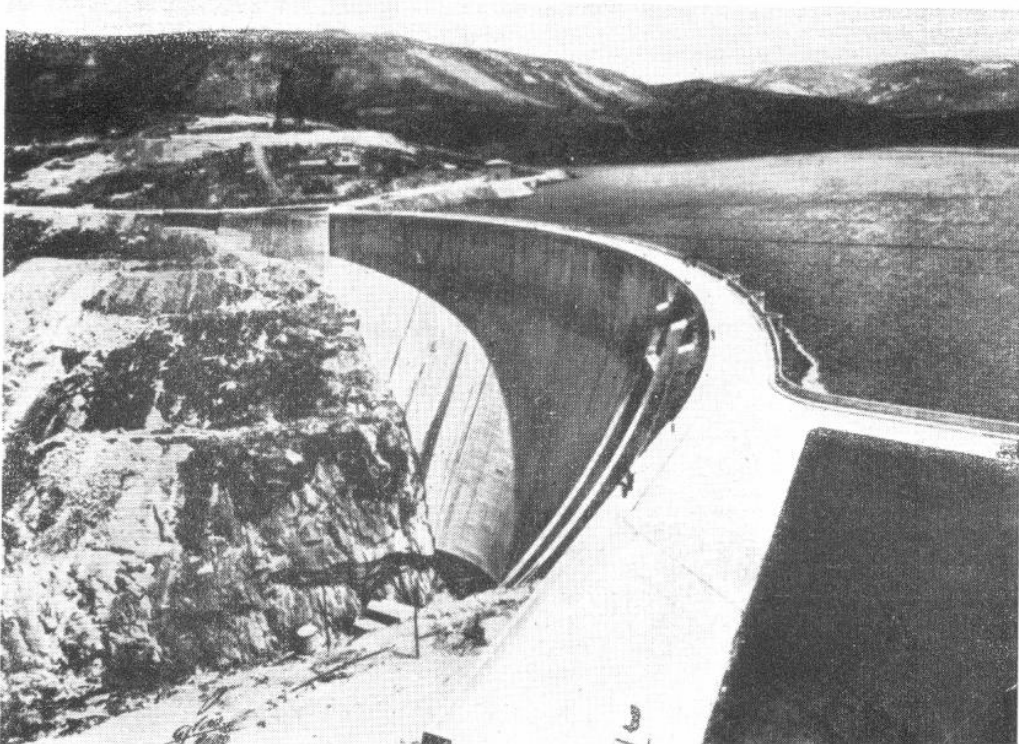


Fig. 1 A — Barragem do Castelo do Bode

A barragem de Castelo do Bode (Fig. 1 e 2 e Quadro I), apresenta algumas singularidades importantes. Em primeiro lugar a margem direita constitui um promontório de grande deformabilidade e que na sua parte superior suporta um grande encontro artificial. A barragem, ainda que sendo aproximadamente simétrica, tem duas aberturas de cerca de 15 x 12 m para o evacuador de cheias. Acima destas aberturas foi dado um espessamento à barragem a fim de garantir melhor

a transmissão dos esforços de um para o outro lado das aberturas. A barragem foi calculada por ajustamentos radiais entre quatro arcos e 5 consolas.

Empreenderam-se<sup>4</sup> estudos sobre modelos para determinar o campo geral de tensões, as dimensões mais convenientes do espessamento da barragem na região do evacuador de cheias e as dimensões do encontro. Foi construído um primeiro modelo (Quadro III) à escala 1/75 no qual foram reproduzidas as diversas propriedades

QUADRO II  
 CARACTERISTICAS DAS FUNDAÇÕES DAS PRINCIPAIS  
 BARRAGENS-ARCO PORTUGUESAS

BARRAGENS		Castelo do Bode	Venda Nova	Cabril	Salamonde	Cançada	Bouçã	
Margem direita	Parte superior	Rocha	xisto alterado	xisto (em cima)	granito	granito	granito	xisto alterado
		$E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	40.000	40.000	150.000	80.000	100.000	20.000
	Parte inferior	Rocha	xisto cristalino	granito	granito são	granito são	granito são	xisto
		$E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	110.000	100.000	200.000	200.000	200.000	60.000
Fundo do vale	Rocha	xisto cristalino	granito são	granito são	granito são	granito são	granito e xisto	
	$E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	110.000	200.000	220.000	200.000	200.000	100.000	
Margem esquerda	Parte inferior	Rocha	xisto cristalino	granito são	granito são	granito	granito são	granito
		$E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	110.000	200.000	200.000	80.000	150.000	100.000
	Parte superior	Rocha	xisto cristalino são	granito alterado (em cima)	granito	granito alterado	granito alterado	granito alterado
		$E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	200.000	50.000	70.000 e 105.000 (superior)	20.000	50.000	20.000
Ensaio realizados	No Laboratório	+ 41 tarolos 12 prismas	+ 73 tarolos 10 prismas	+ 78 tarolos 16 prismas	+ 30 tarolos 11 prismas	+ 55 tarolos 6 prismas	+ 78 tarolos 34 prismas	
	No local	1 poço ensaiado c/água sob pressão	—	5 galerias ensaiadas com macacos	5 galerias ensaiadas com macacos 2 galerias ensaiadas com água sob pressão	2 galerias ensaiadas com macacos	2 galerias ensaiadas com macacos	



QUADRO III

MODELOS DAS PRINCIPAIS BARRAGENS-ARCO PORTUGUESAS

Barragens	Soluções estudadas	N.º de modelos ensaiados	Escala dos modelos	Material de construção do modelo e sistema de carga	Duração dos ensaios (meses)	Custo dos ensaios (dollars)
Castelo do Bode	Solução I	1	1/ 75	Gd — Hg	8	4.800
	" II	4	1/500	Gd — M	4	
Venda Nova	Solução I	1	1/100	Gd — Hg	8	6.000
	" II	2	1/300	Gd — M	4	
	" III	2	1/ 30	Gd — M	3	
Cabril	Solução I	2	1/300	Gd — Hg	6	7.800
	" II	2	1/300	Gd — Hg	4	
	" III	2	1/300	Gd — Hg	4	
	" IV	1	1/400	A — Hg	6	
	" V	1	1/400	A — Hg	3	
Salamonde	Solução I	2	1/200	Gd — Hg	6	7.200
	" II	2	1/200	Gd — Hg	4	
	" III	2	1/200	Gd — Hg	4	
	" IV	2*	1/200	Gd — Hg	4	
Caniçada	Solução I	2	1/200	Gd — Hg	6	4.200
	" II	2	1/200	Gd — Hg		
Bouçã	Solução I	3	1/200	Gd — Hg	6	3.000

- NOTAS: Gd — Mistura de gesso e diatomite.  
A — "Alkathene".  
Hg — Mercúrio contido num saco de borracha.  
M — Sistema de macacos.  
\* — Um modelo de "Marco" foi também construído na escala 1/250.

QUADRO IV

APARELHOS COLOCADOS NAS BARRAGENS-ARCO PORTUGUESAS

BARRAGENS		Castelo do Bode	Venda Nova	Salamonde	Cabril	Caniçada	Bouçá
Deslocamentos pelos métodos geodésicos	Pilares de estacionamento...	4	3	4	4	4	4
	Marcas de pontaria.....	17	18	14	19	14	14
	Pontos de contróle.....	4	5	4	5	4	5
	Alinhamentos.....	4	—	6	3	6	6
	Marcas de nivelamento.....	25	15	10	21	10	10
Outras observações	Pêndulo.....	3	3	1	2	1	—
	Bases de coordinómetro....	—	—	—	—	—	—
	Bases de coordinómetro-clinómetro.....	20	—	6	6	6	—
	Bases de clinómetro.....	3	3	14	14	14	10
	Extensômetros.....	164 (a)	181 (a)	140 (b)	198 (c)	184 (c)	179 (c)
	Células Carlson.....	—	—	—	—	6	9
	Termômetros de resistência.	71	80	—	—	—	—
	Pares termoeletricos.....	44	53	50	50	26	33
	Medidores de sub-pressão..	—	—	—	12	—	—
	Medidores de pressão Carlson.....	—	—	—	—	6	6
	Juntas com elongâmetro....	151	55	43	100	50	50
	Medidores de juntas.....	—	—	21 (b)	55 (c)	21 (c)	49 (c)
	Medidores de humidade... ..	—	—	—	6	6	6
	Comprimento dos cabos (m)	15.000	8.000	3.000	7.000	6.000	11.500

(a) Telemac

(b) Galileo

(c) Carlson



mecânicas do terreno de fundação. A rotura dêsse modelo que sobreveio no terceiro ensaio de carga mostrou a vantagem de aumentar as dimensões do encontro da margem direita.

Construíram-se depois quatro modelos de pequenas dimensões, à escala 1/500, a fim de apressar a construção e a secagem. Estes modelos fôram carregados com um sistema de 26 macacos hidráulicos de diferentes diâmetros.

Os resultados dos ensaios Fig. 3) mostram que na região do evacuador as direções das tensões principais são desviadas pelas aberturas praticadas na barragem. As tensões de compressão máximas devidas à pressão hidrostática não ultrapassam  $45 \text{ kgcm}^{-2}$  a jusante e  $28 \text{ kgcm}^{-2}$  a montante. Nestas regiões o cálculo fornecia tensões máximas horizontais, nos arcos, de 42 e  $43 \text{ kgcm}^{-2}$  respectivamente. As tensões de tração máximas observadas na base de barragem a montante para a pressão hidrostática são de  $21 \text{ kgcm}^{-2}$ .

Na fig. 3 indicam-se também para os pontos do paramento de montante na base da barragem a composição das tensões máximas devidas à pressão hidrostática com as tensões devidas ao peso próprio calculadas analiticamente. As tensões de tração devidas à pressão hidrostática são praticamente anuladas. O mesmo sucede com as tensões de tração na base do encontro da margem direita.

Quanto às aberturas do evacuador de cheias concluiu-se que, apesar das suas grandes dimensões elas não perturbavam senão localmente as tensões na barragem sendo a continuidade da abóbada inteiramente assegurada pelo arco que existe por cima dessas aberturas. A espessura dêste arco deveria ter sido reduzida pois que, dada a sua rigidez, as tensões que se desenvolvem na sua vizinhança são elevadas.

Também os ensaios sôbre modelo permitiram dimensionar a armadura vertical a colocar junto das faces interiores, verticais, das aberturas a fim de suportar as elevadas tensões de tração que aí se desenvolvem<sup>4</sup>.

A observação, pelo método geodésico, dos deslocamentos da própria barragem revela um movimento de tôda a barragem para a margem direita e movimentos importantes do encontro desta margem os quais atingem quase 2 cm. Tais deslocamentos são uma consequência por um lado da pressão hidrostática sôbre o próprio promontório de apôio da barragem e por outro lado do baixo módulo de elasticidade da rocha dessa região (cêrca de  $40.000 \text{ kgcm}^{-2}$ ). Porém, os deslocamentos estão a ser assintóticos no tempo pelo que se conclui que a obra apresenta condições de segurança.

Constata-se que os deslocamentos observados na parte superior da barragem são muito influenciados pelas variações de temperatura do ar.

Na Fig. 5 apresentam-se alguns resultados típicos das observações com extensómetros. Êsses extensómetros estão dispostos em rosetas de quatro extensómetros a  $45^\circ$  entre si e um corretor<sup>13</sup>.

A análise dos diagramas mostra imediatamente uma diferença muito grande nos seus andamentos. Assim, os diagramas dos grupos de jusante 2 j e 3 j têm andamentos conjugados com os da temperatura do ar acusando compressões com as subidas de temperatura. Os diagramas dos grupos 1 m, 2 m e 3 m, colocados a 1 m de montante, e os do grupo 1 j, que fica protegido pelo edificio da central, são muito pouco influenciados pelas variações de temperatura.

O grupo 1 m acusou durante o ano de 1949 um aumento contínuo das extensões negativas devidas ao aumento do pêso próprio durante o crescimento da barragem. Para o fim dêsse ano houve uma descompressão devida à descida da temperatura e de seguida um novo aumento das extensões negativas devido à subida da temperatura. Desde que a albufeira encheu deixou de se verificar o efeito das variações de temperatura do ar sôbre o andamento dos diagramas passando os extensómetros a acusar unicamente os efeitos das variações de nível e do arrefecimento geral da barragem, efeitos êsses aliás não muito acentuados.

O grupo 1 j nunca acusou apreciáveis variações de extensão podendo no entanto notar-se, principalmente na direção vertical, o efeito das variações de nível na albufeira.

A onda anual da temperatura do ar cujo efeito se faz sentir sem atraso sensível nos grupos 2 j e 3 j produz um estado de tensão hidrostático como mostra o paralelismo dos diagramas relativos às direções a 45° do grupo 2 j e vertical e horizontal do grupo 3 j que são as direções menos afetadas nos dois grupos pela variação de nível na albufeira. Em contrapartida os diagramas nas direções horizontal e vertical do grupo 2 j e a 45° do grupo 3 j, que são as mais afetadas pelas variações de nível na albufeira, aproximam-se e afastam-se com essas variações de nível. O mesmo se pode dizer relativamente ao grupo 3 m, embora aí as variações de extensão devidas às variações de temperatura sejam pequenas.

Na Fig. 6 estão traçadas para quatro épocas típicas do ano de 1954, em que o calor de hidratação do cimento já tinha sido dissipado, as isotérmicas

e as linhas de fluxo na barragem de Castelo do Bode e na água da albufeira. Estão indicadas as temperaturas médias mensais do ar (TA) no mês anterior ao dia em que se fizeram as medições.

A análise da figura mostra que a água da albufeira ainda sofre variações apreciáveis de temperatura a profundidades da ordem dos 50 m. Por outro lado as isotérmicas da água junto às entradas tomadas de água, representadas a tracejado nas Figs. 2 e 6, mudam de direção passando a ser verticais o que se julga ser devido às correntes que se estabelecem à entrada da água nas condutas forçadas. Êste fato dá origem a fluxos singulares do calor a montante e junto à base da barragem, como se vê nos desenhos relativos a 30 de Outubro e a 30 de Dezembro de 1954.

As linhas de fluxo traçadas na barragem mostram que esta cede calor à água e à rocha de fundação, durante todo o ano. Pelo que se refere às trocas de calor pelo paramento de jusante a barragem recebe calor durante os meses de verão e cede-o ao ar durante o inverno. A influência da radiação solar sôbre o paramento de jusante é muito acentuada pois êste é virado a sudoeste. Sobretudo na zona do coamento onde as radiações solares incidem por cima e por jusante as temperaturas atingem valores muito elevados. A diferença entre as temperaturas dos dois termômetros do coamento e as temperaturas médias do ar dá uma idéia da influência da radiação solar. Tem-se chegado a observar diferenças de 12°C entre a temperatura da superfície do betão e a temperatura do ar a um metro dessa superfície.

*(Continua no próximo número)*



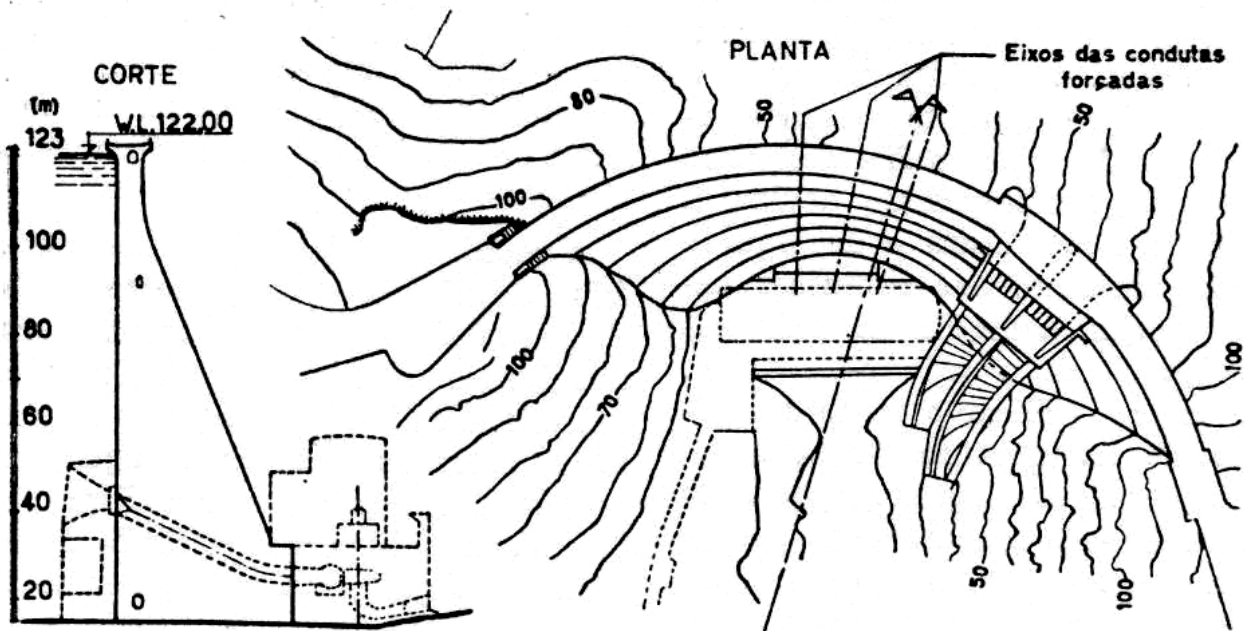


FIG. 2 - BARRAGEM DE CASTELO DO BODE. Planta e corte

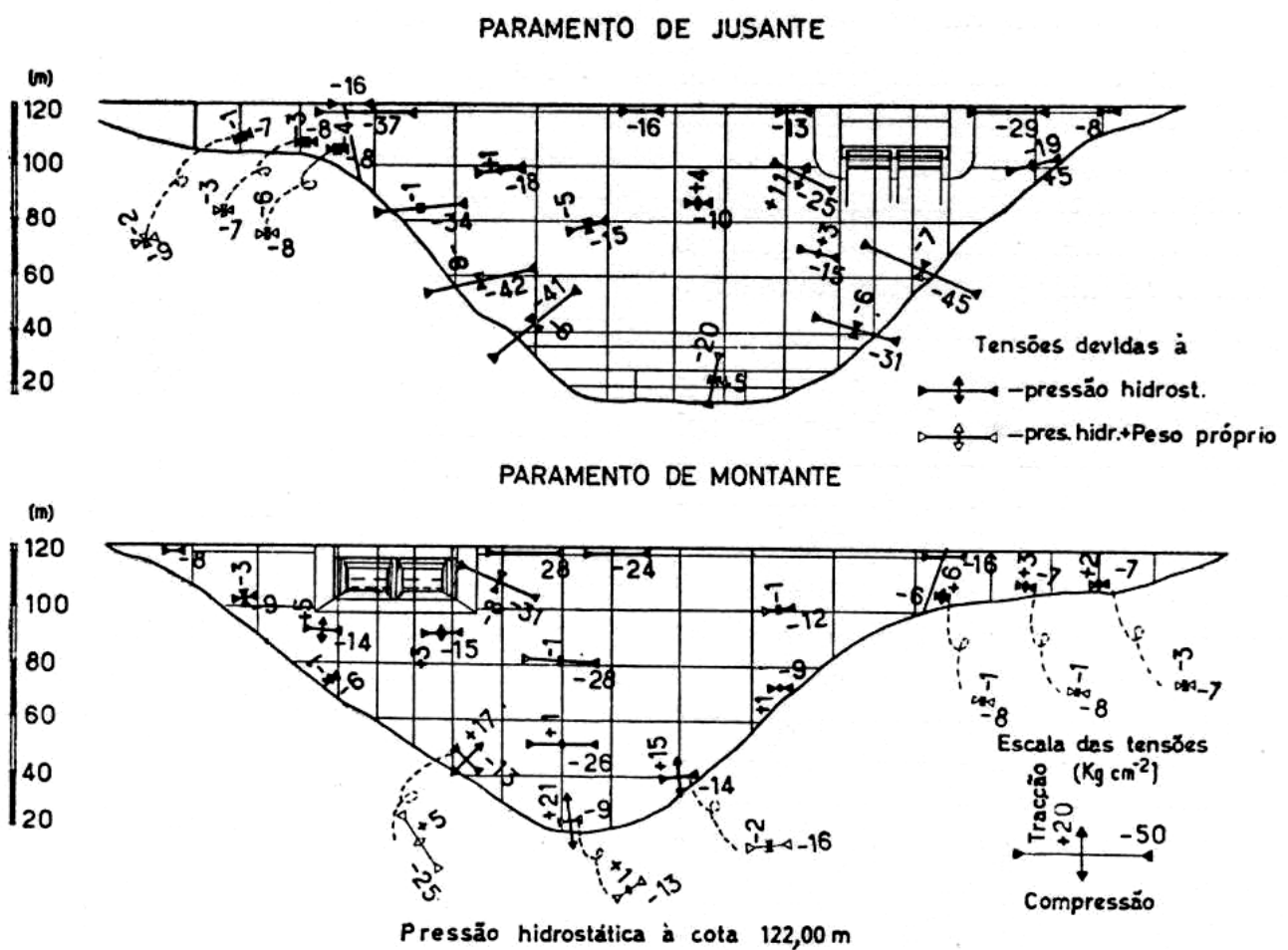


FIG. 3 - BARRAGEM DE CASTELO DO BODE. Tensões obtidas nos ensaios em modelos.

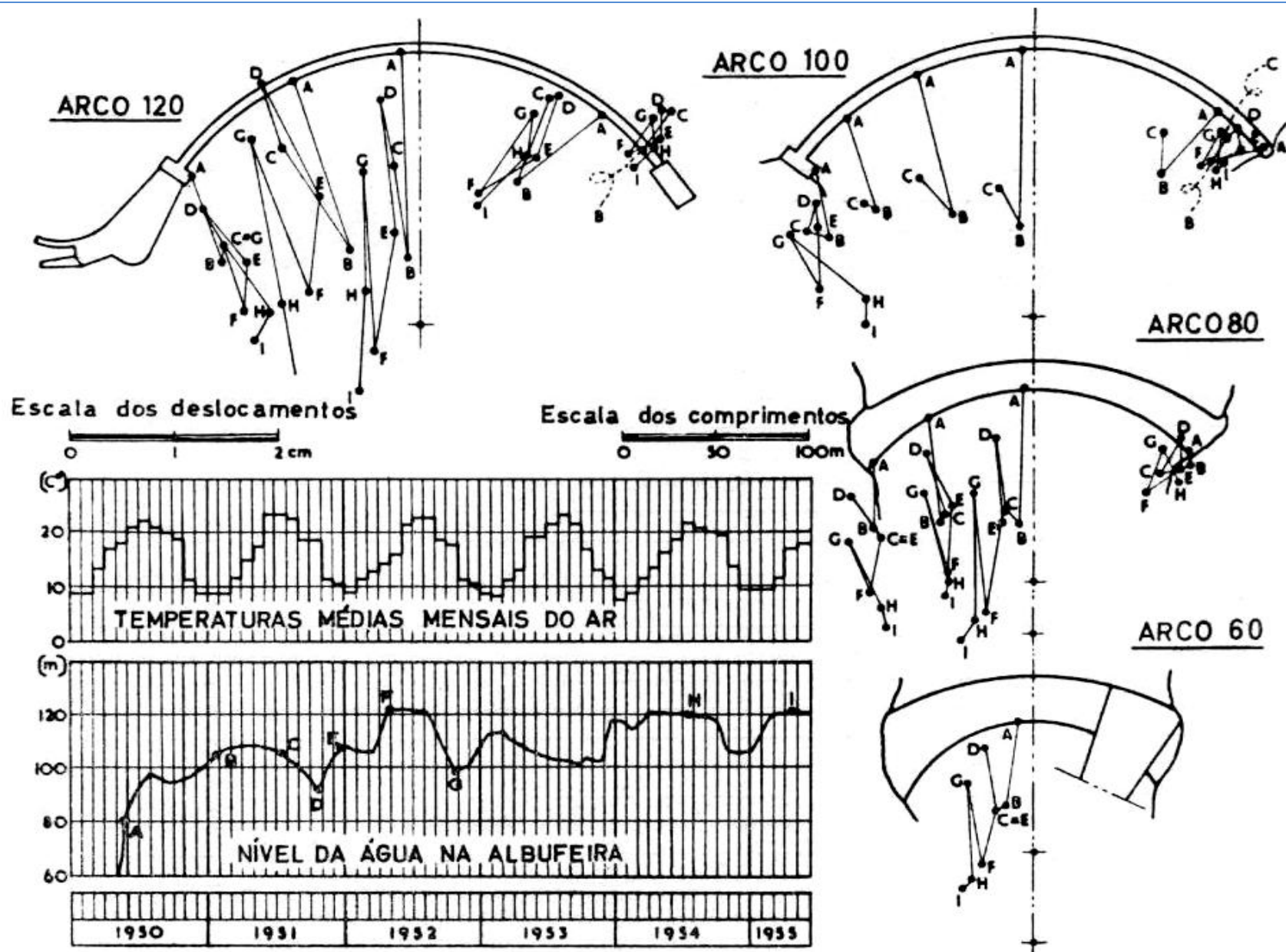


FIG. 4 - BARRAGEM DE CASTELO DO BODE. Deslocamentos horizontais observados pelo método geodésico



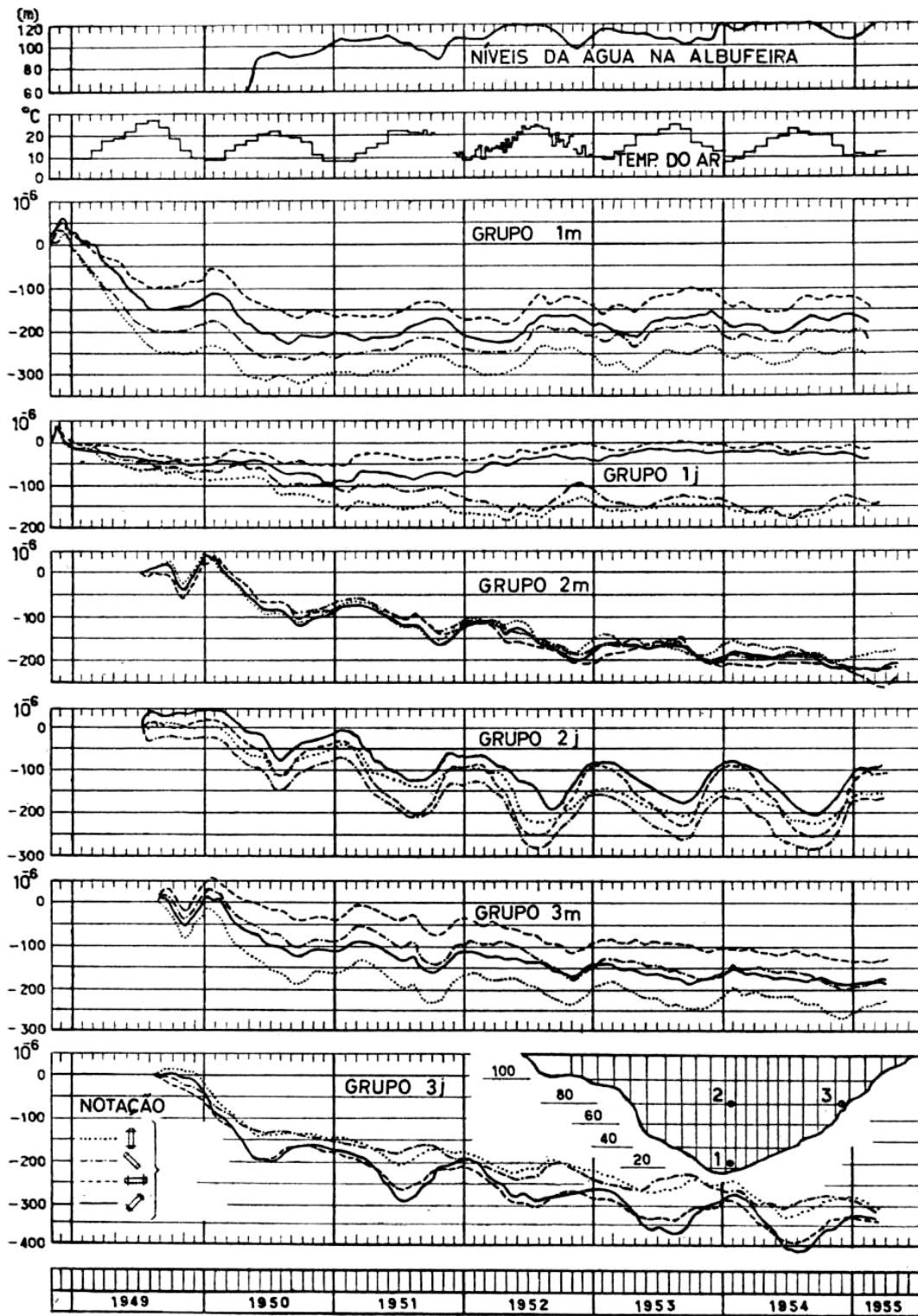


FIG.5 -BARRAGEM DE CASTELO DO BODE. Extensões corrigidas observadas em pontos a 1m dos paramentos de montante e de jusante

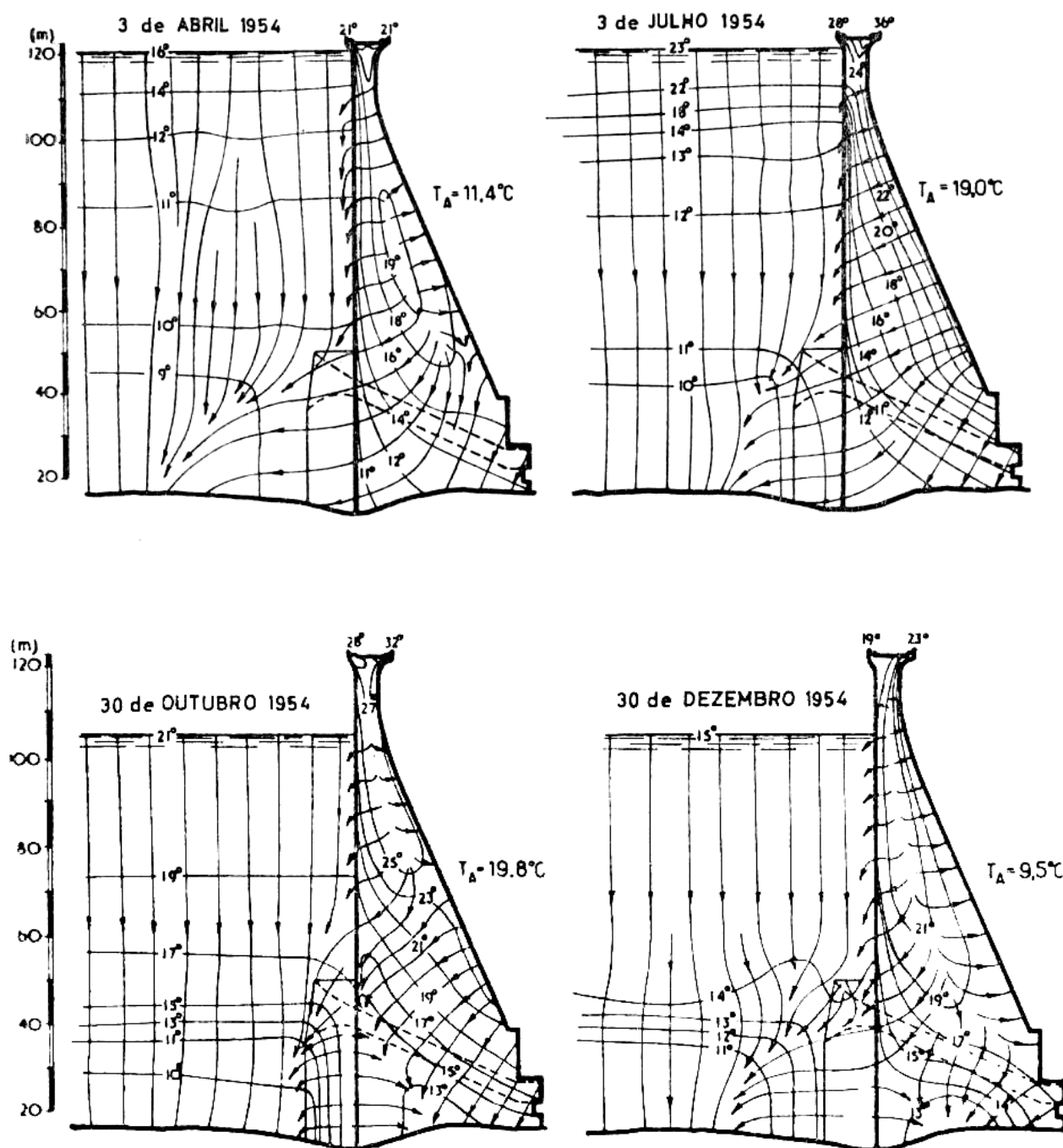


FIG. 6 - BARRAGEM DE CASTELO DO BODE. Linhas de fluxo e isotérmicas



# Anexo 01

## Barragem do Funil - 1969 - RJ / Brasil -216 MW



### Obra projetada com apoio em modelos reduzidos 1969

[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_funil.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funil.asp)

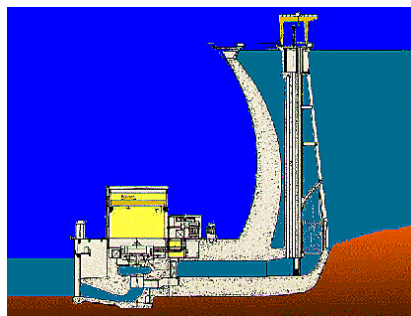
A Usina Hidrelétrica de Funil é diferente das demais usinas de FURNAS. Com uma abóbada de concreto, com dupla curvatura, ela foi construída no rio Paraíba do Sul, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro. Sua operação teve início em 1969.



### Foto Google 2012

O projeto foi feito pelo Eng. Joaquim Laginha Serafim, engenheiro da firma COBA e do LNEC.

Também foi feito modelo reduzido : *Estudo experimental da barragem do Salto Funil e estudo em modelo reduzido dos órgãos hidráulicos do aproveitamento do Salto Funil.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa -1962



### BARRAGEM

Tipo: abóbada de dupla curvatura . Altura máxima: 85 m .  
Desenvolvimento no coroamento: 385m  
Largura no coroamento: 3,6 m . Volume total: 270.000 m<sup>3</sup>

Novos Métodos de Análise estão sendo usados atualmente.  
Ver as teses recentes nas Universidades de Portugal

### Referência 01

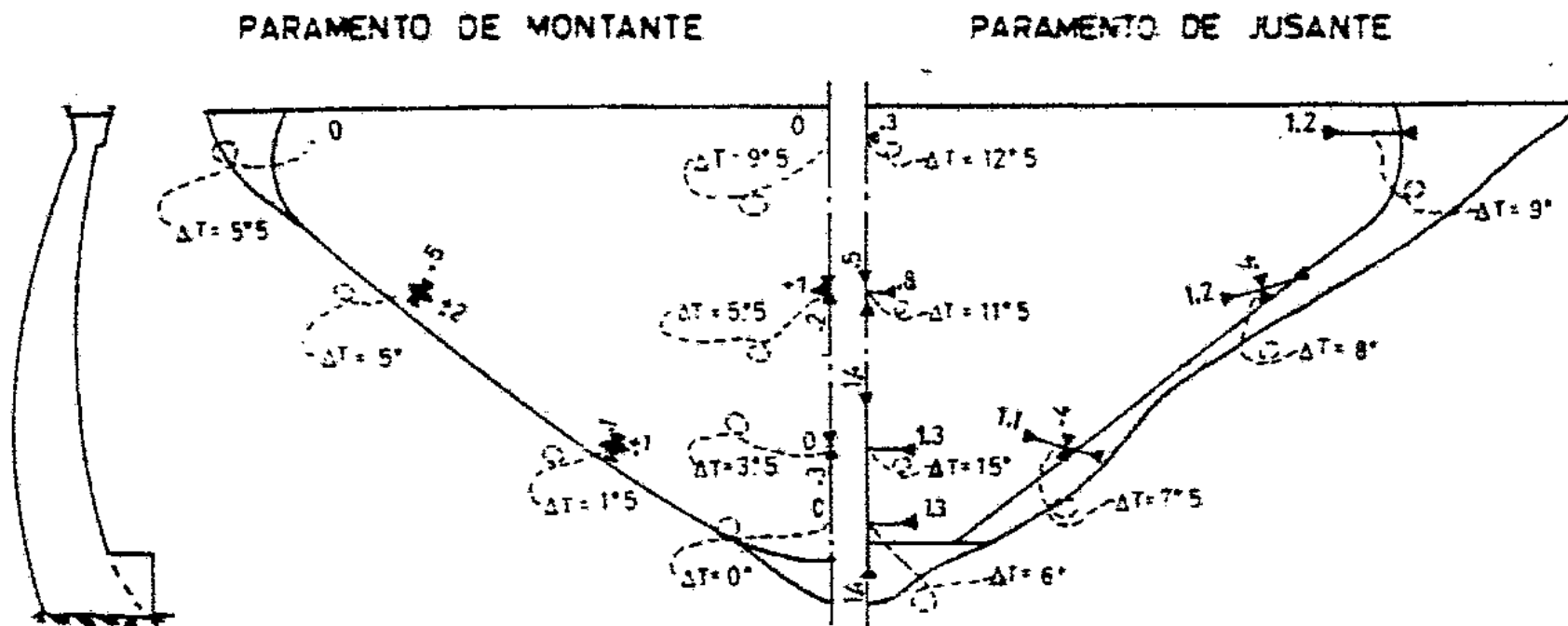
Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia

Dissertação de Doutoramento : **Comportamento Térmico de Barragens de Betão**

Previsão do Calor Gerado Durante a Construção de uma Barragem de Betão

Autor : *Madalena Teles*

[www.engenhariacivil.com/previsao-calor-gerado-construcao-barragem-betao](http://www.engenhariacivil.com/previsao-calor-gerado-construcao-barragem-betao)



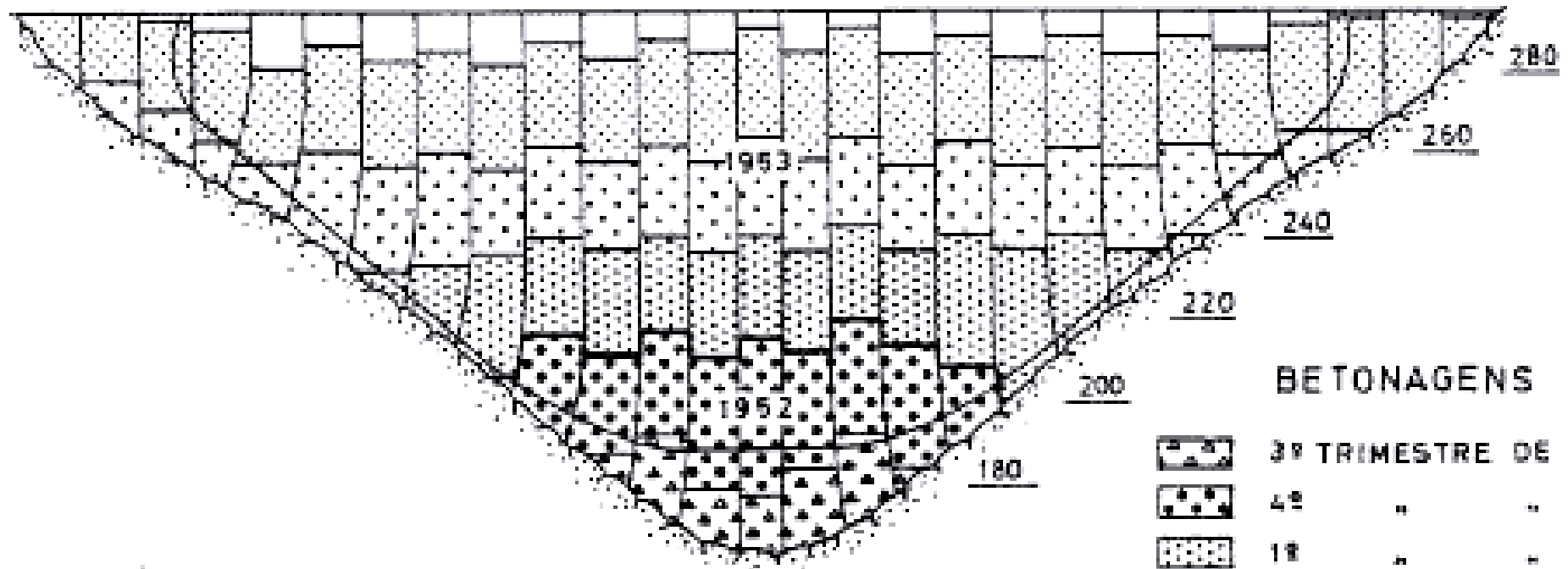
Colocação da aparelhagem e tensões térmicas obtidas no modelo experimental do Cabril



# Barragem do Cabril

M. D.

M. E.

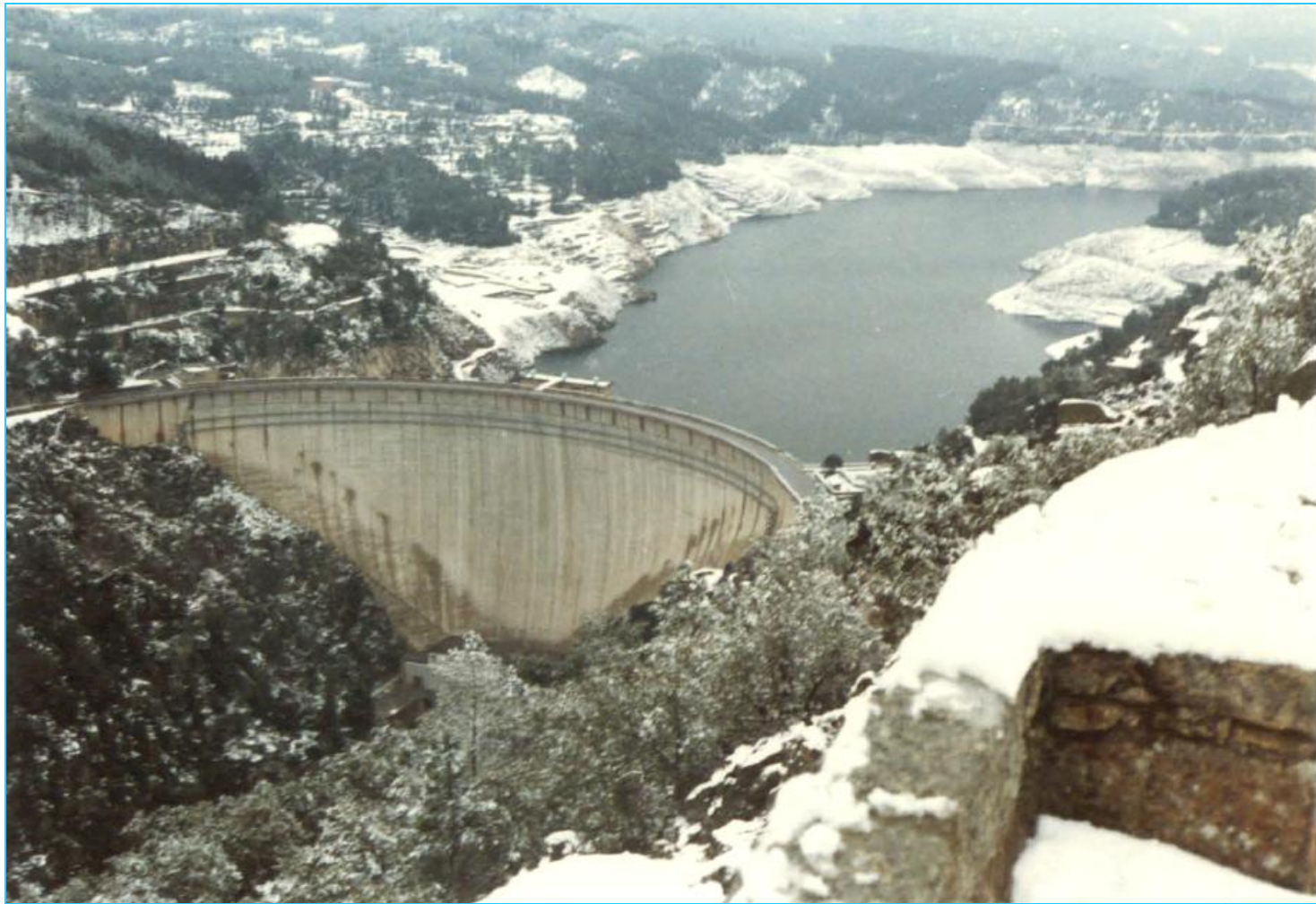


## BETONAGENS

	3ª	TRIMESTRE DE	1952
	4ª	"	"
	1ª	"	1953
	2ª	"	"
	3ª	"	"
	4ª	"	"

Sequência da construção

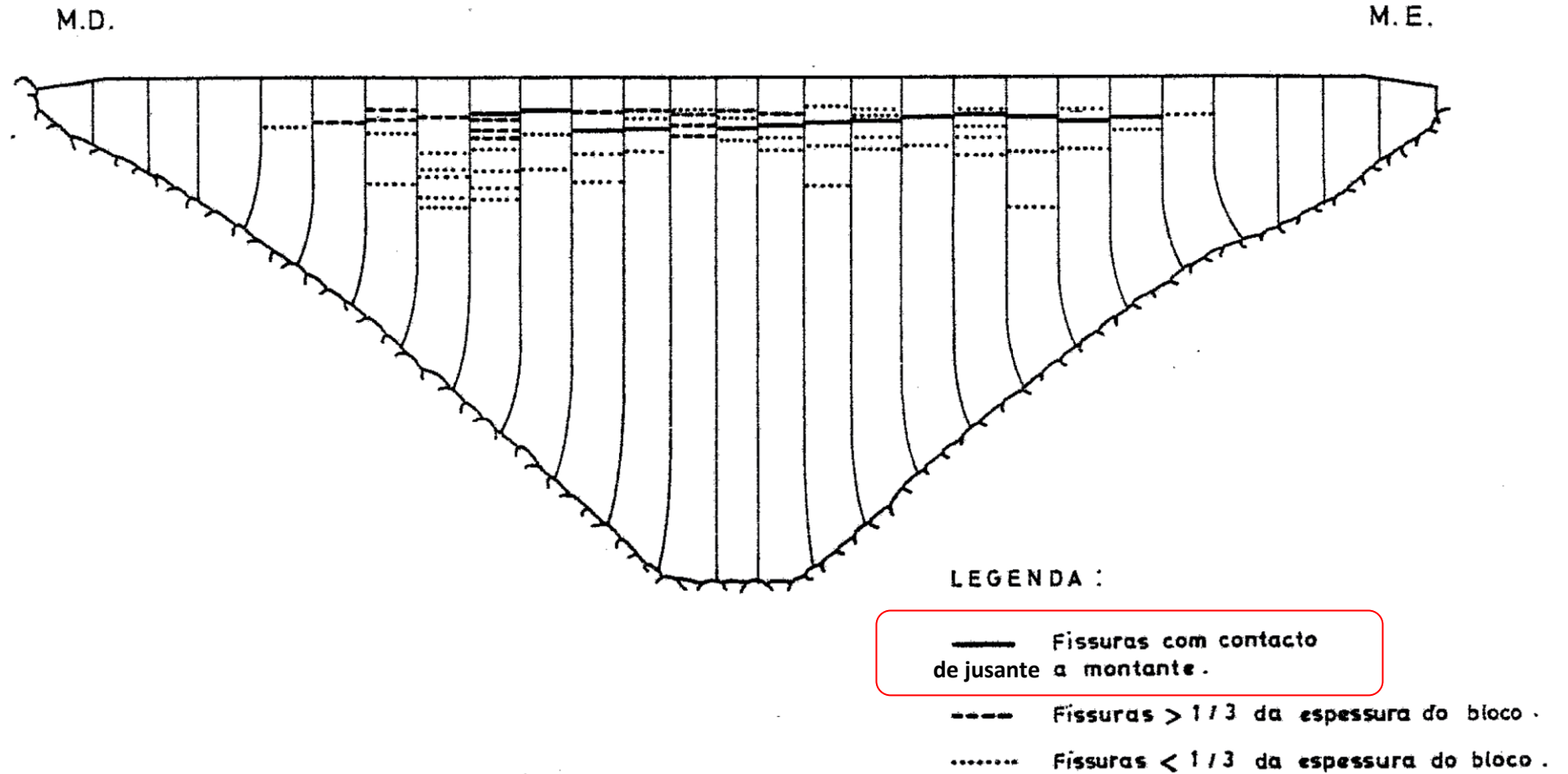
Barragem do Cabril



Inverno



Fissuras mais importantes no paramento  
de jusante da barragem do Cabril



**Comentário :** A parte superior da barragem foi atravessada por uma superfície fissurada de jusante a montante.

# Referência 02

**U. PORTO**

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

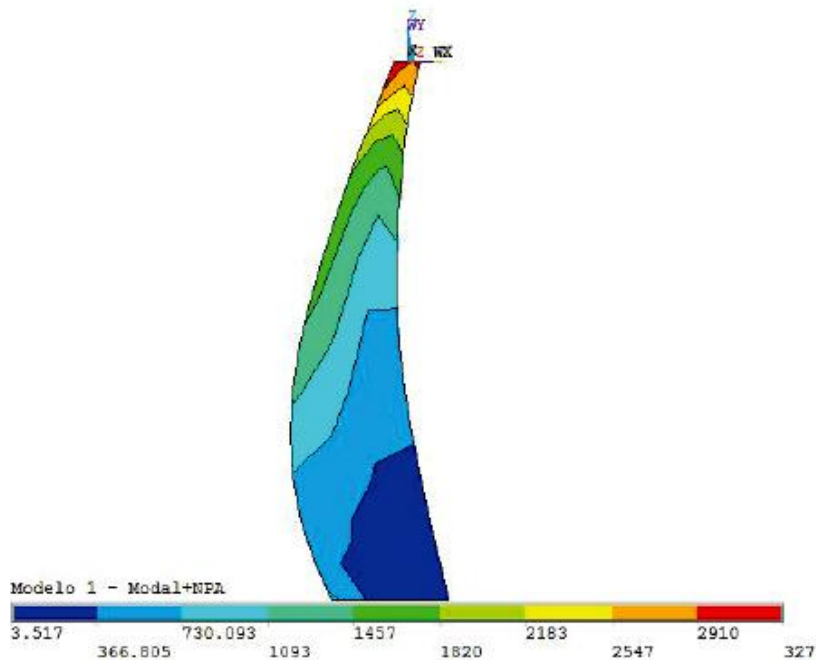
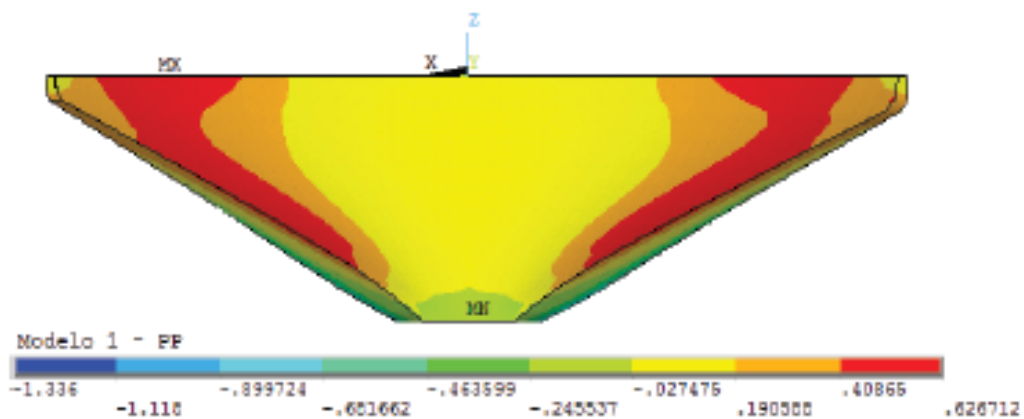
## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS ABÓBADA COM DESCARREGADORES DE SUPERFÍCIE DE GRANDES DIMENSÕES

BRUNO FILIPE QUINTAS VIEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

JUNHO DE 2009

<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58472>



Utilização de elementos finitos