

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

## Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**NÃO CONFIDENCIAL**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS

Núcleo de Observação

Proc. 43/13/9208

Proc. 43/01/3637

---

# A UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIAS HIDROGEOQUÍMICAS NA OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS

Aplicação à Barragem de Cahora-Bassa

RELATÓRIO 89/89 – NO

Lisboa, Abril de 1989

---

Estudo subsidiado pelo PIDDAC

---

I&D  
BARRAGENS



### NOTA PRÉVIA

Este relatório foi elaborado com base no trabalho de síntese intitulado "ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO. APLICAÇÃO Á BARRAGEM DE CAHORA-BASSA" apresentado a concurso para acesso a Assistente de Investigação pelo Estagiário de Investigação Henrique dos Santos da Silva, cujas provas públicas se realizaram em 89-03-10.

Às empresas Hidroeléctrica de Cahora-Bassa, HCB, em particular, a cuja barragem este estudo é dedicado, e á Electricidade de Portugal, EDP, agradecem-se as facilidades concedidas para obtenção dos dados de observação utilizados.



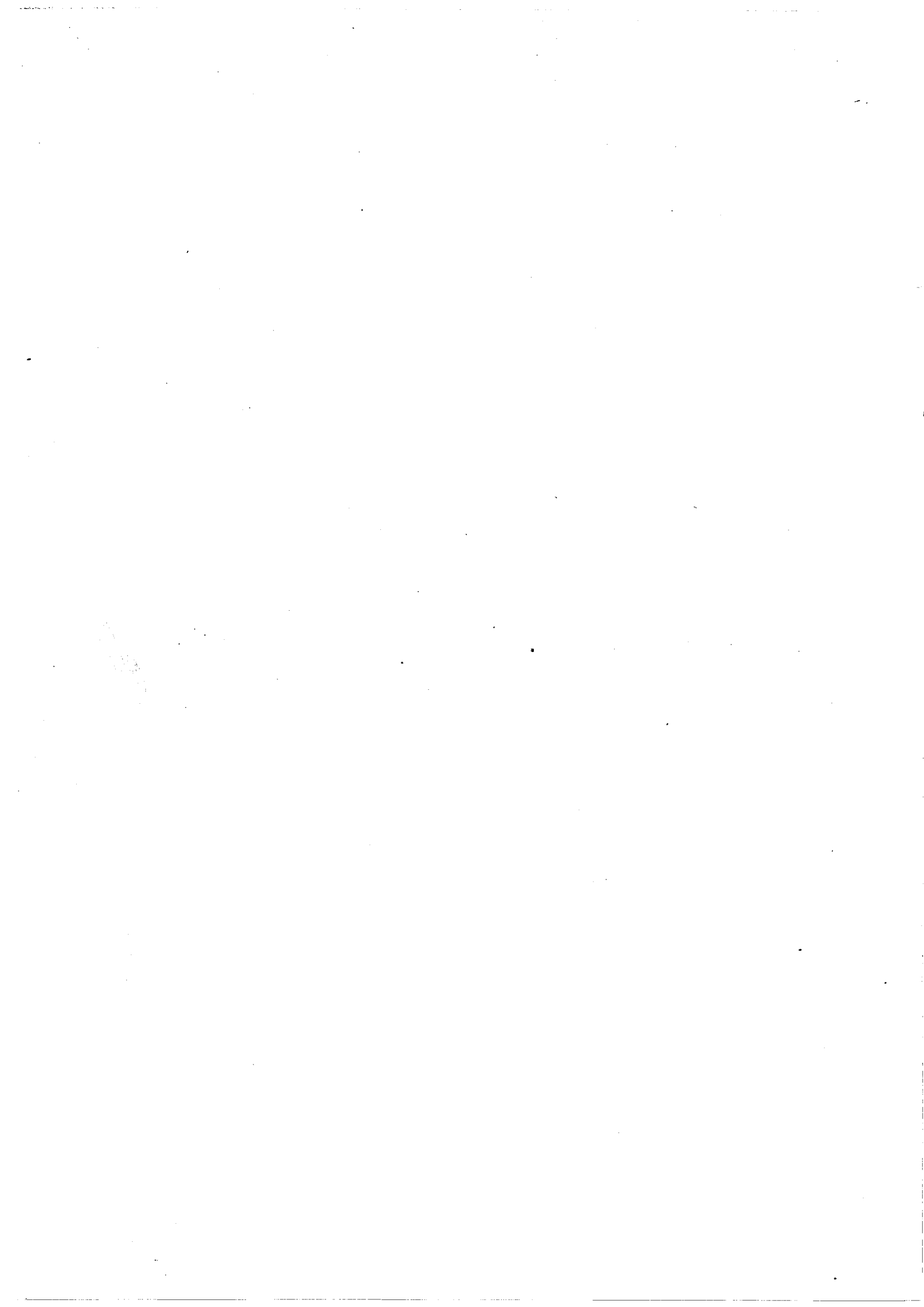
A UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIAS HIDROGEOQUÍMICAS NA OBSERVAÇÃO  
DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS.  
APLICAÇÃO Á BARRAGEM DE CAHORA-BASSA.

RESUMO

No presente trabalho abordam-se três ordens de aspectos relevantes para a observação das fundações das barragens de betão:

- principais acções e efeitos resultantes da actuação da água sobre os materiais e as estruturas;
- sistemas e metodologias de observação;
- estudo e análise do comportamento observado.

Tecem-se resumidamente algumas considerações de ordem geral sobre estes aspectos (Parte I) e faz-se a apresentação dos resultados da aplicação desses conceitos e metodologias ao estudo do comportamento observado da fundação da barragem de Cahora-Bassa (Parte II).



## ABSTRACT

This work deals with three aspects of interest for the observation of concrete dams foundations:

- main actions and effects resulting from water upon materials and structures;
- monitoring systems and observation methodologies;
- study and analysis of observed behaviour.

The paper presents some brief general considerations on these aspects (Part I) as well as results of the application of these concepts and methodology to the study of the observed behaviour of Cahora-Bassa dam foundation (Part II).





## RÉSUMÉ

Ce travail s'occupe de trois ordres d'aspects qui sont d'importance pour l'observation des fondations des barrages en béton:

- principales actions et effets résultant de l'eau sur les matériaux et structures;
- systèmes d'auscultation et méthodologies d'observation;
- étude et analyse du comportement observé.

On présente brièvement quelques considérations d'ordre générale sur ces aspects (Partie I), ainsi que des résultats de l'application de ces concepts et méthodologies à l'étude du comportement observé de la fondation du barrage de Cahora-Bassa (Partie II).



# ÍNDICE

## PARTE I

### "CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS PRINCIPAIS ACÇÕES E EFEITOS E SOBRE AS METODOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO"

Cap.	Pag.
1 - INTRODUÇÃO.....	3
2 - GENERALIDADES SOBRE O FUNCIONAMENTO HIDROMECÂNICO DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO.....	5
2.1 - Influência da água na deterioração das barragens.....	5
2.2 - Principais acções e efeitos.....	11
2.2.1 - Esforços induzidos.....	11
2.2.2 - Acções da água.....	12
2.2.2.1 - Pressão hidrostática.....	12
2.2.2.2 - Subpressão.....	12
2.2.2.3 - Acções da percolação.....	13
2.2.3 - Variações de temperatura.....	23
2.2.4 - Acções sísmicas.....	29
2.2.5 - Outras acções.....	33
2.2.5.1 - De natureza tectónica.....	33
2.2.5.2 - Induzidas por outras obras.....	34
2.2.5.3 - Descarregamentos.....	34
2.3 - Sistemas de observação do comportamento hidromecânico das fundações.....	35
2.3.1 - Sentido evolutivo.....	35
2.3.2 - Perspectivas de desenvolvimento.....	41

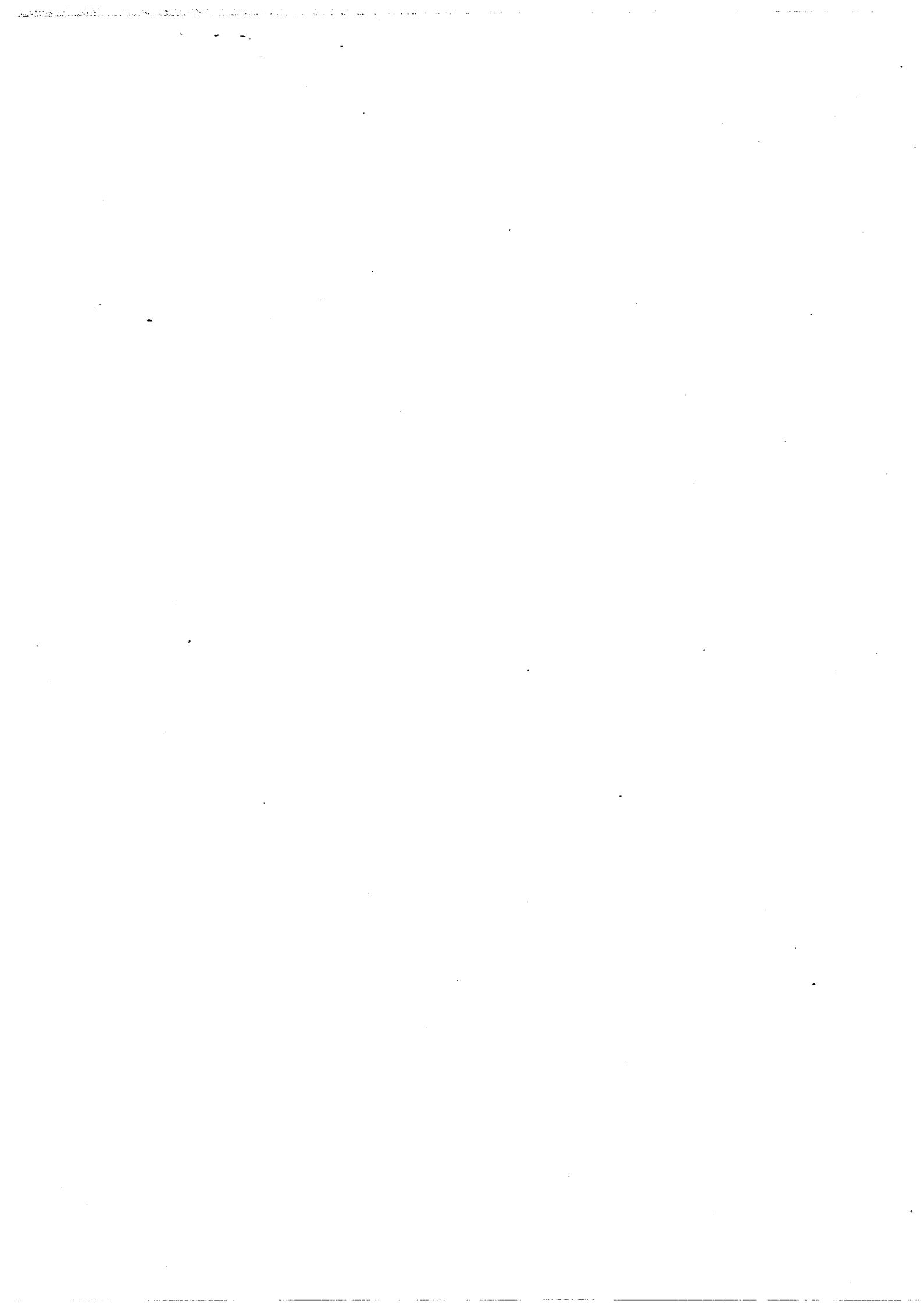
## PARTE II

### "APLICAÇÃO À BARRAGEM DE CAHORA-BASSA"

3 - A ESTRUTURA E O MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE CAHORA-BASSA.....	45
---	----

Cap.	Pag.
3.1 - Características gerais do empreendimento.....	45
3.1.1. - Barragem e reservatório.....	45
3.1.2 - Sistemas de observação utilizados.....	46
3.2 - Aspectos geológicos.....	50
3.2.1 - Caracterização regional.....	50
3.2.2 - Caracterização local.....	54
3.2.3 - Caracterização hidromecânica e geoquímica do maciço de fundação.....	59
3.2.3.1 - Caracterização hidráulica.....	59
3.2.3.2 - Caracterização mecânica.....	60
3.2.3.3 - Caracterização geoquímica.....	63
3.3 - Obras de impermeabilização e drenagem.....	66
4 - COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO OBSERVADO.....	67
4.1 - Observação das acções .....	67
4.1.1 - Acções da água.....	67
4.1.1.1 - Pressão hidrostática.....	67
4.1.1.2 - Subpressão.....	67
4.1.1.3 - Hidroquímica.....	68
4.1.2 - Acção das variações de temperatura.....	69
4.1.3 - Acções sísmicas.....	72
4.2 - Observação das respostas estrutural e hidráulica.....	74
4.2.1 - Deslocamentos observados na base da barragem.....	74
4.2.1.1 - Medidos com pendulos.....	74
4.2.1.2 - Medidos com bases de alongâmetro.....	75
4.2.2 - Caudais drenados.....	77
4.2.2.1 - Análise qualitativa da evolução dos caudais e das sub- pressões mais significativos medidos em drenos.....	77
4.2.2.2 - Ensaio efectuados na rede de drenagem em 1985.....	83
4.2.2.3 - Análise quantitativa de caudais drenados.....	91

Cap.	Pag.
4.2.3 - Subpressões.....	105
4.2.3.1 - Análise qualitativa das subpressões medidas na rede piezométrica.....	105
4.2.3.2 - Ensaio efectuados com piezómetros em 1985.....	110
4.2.3.3 - Análise quantitativa de caudais e subpressões medidos em piezómetros.....	112
5 - ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO.....	125
5.1 - Composição química da água da albufeira.....	125
5.2 - Composição química da água percolada.....	132
5.3 - Caracterização hidrogeoquímica da água percolada.....	138
5.3.1 - Parâmetros indicadores.....	138
5.3.2 - Relações do pH com concentrações iónicas.....	141
5.3.3 - Índice de saturação (i).....	146
5.3.4 - Índice de desequilíbrio entre cloretados e alcalinos...147	
5.3.5 - Relações iónicas (rNa/rCa, rMg/rCa, rK/rNa, rSO <sub>4</sub> /rCl)..148	
5.4 - Taxas de arraste e de precipitação de sais em solução...151	
5.5 - Análise hidrogeoquímica global.....	162
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	165
6.1 - Sobre as acções.....	165
6.1.1 - Da água.....	165
6.1.2 - Das variações de temperatura.....	166
6.1.3 - Sísmicas.....	166
6.2 - Sobre o comportamento da fundação.....	166
6.2.1 - Mecânico.....	166
6.2.2 - Hidráulico.....	167
6.2.3 - Hidrogeoquímico.....	168
6.3 - Sobre o trabalho realizado e as perspectivas futuras.....	169



## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

- Fig.1 - Caracterização das principais deteriorações observadas em barragens devidas á acção da água.
- Fig.2 - Caudais totais drenados na fundação da barragem da Venda Nova entre 1974 e 1986.
- Fig.3 - Influência da pressão de CO<sub>2</sub> da temperatura e do pH na solubilidade de algumas substâncias.
- Fig.4 - Influência da drenagem e do clima na alteração dos minerais mais comuns (A) e produtos usuais da alteração (B).
- Fig.5 - Variações de temperatura observadas em fundações de barragens.
- Fig.6 - Influência das variações de temperatura na abertura de fracturas.
- Fig.7 - Influência da temperatura na viscosidade cinemática da água
- Fig.8 - Sismos induzidos pela instalação de albufeiras.
- Fig.9 - Aspectos mais relevantes da evolução dos sistemas de observação da fundação.

### Capítulo 3

- Fig.10 - Planta do aproveitamento de Cahora-Bassa.
- Fig.11 - Localização dos sistemas de observação de deslocamentos e de subpressões na fundação e dos dados de reconhecimento geotécnico.
- Fig.12 - Localização dos leques piezométricos e definição em planta da zona de tratamento da fundação.
- Fig.13 - Localização da rede de drenagem e definição em alçado da zona de tratamento da fundação.
- Fig.14 - Enquadramento geológico da bacia do rio Zambeze.
- Fig.15 - Esboço da tectónica e litologia regionais.

- Fig.16 - Planta geológica da zona circundante da barragem de Cahora-Bassa.
- Fig.17 - Principais acidentes geológicos e sistemas de diaclases da fundação.

#### Capítulo 4

- Fig.18 - Regime de afluências e evolução dos níveis da albufeira entre 1979 e 1985.
- Fig.19 - Caracterização das variações anuais de temperatura no ar e no betão entre 1975 e 1985.
- Fig.20 - Zonamento sísmico da região NW de Moçambique para o período 1968-1977.
- Fig.21 - Rede de observação sismográfica da albufeira de Cahora-Bassa.
- Fig.22 - Evolução dos deslocamentos horizontais medidos com pêndulos na base da barragem.
- Fig.23 - Evolução do caudal total drenado na fundação da barragem.
- Fig.24 - Subpressões e caudais medidos na rede de drenagem e piezométrica em Novembro de 1985.
- Fig.25 - Subpressões medidas nos piezómetros da margem direita em Novembro de 1985.
- Fig.26 - Subpressões medidas nos piezómetros da margem esquerda em Novembro de 1985.
- Fig.27 - Resultados dos ensaios efectuados em drenos em Novembro de 1985.
- Fig.28 - Relações entre a pressão de injeção e os caudais absorvidos em ensaios tipo Lugeon.
- Fig.29 - Relação entre acções térmicas e comportamento hidráulico da fundação.
- Fig.30 - Curvas de influência das variações de temperatura no comportamento dos caudais ao longo do ano.
- Fig.31 - Curvas de influência das variações de temperatura nos deslocamentos horizontais da consola central.



- Fig.32 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais drenados.
- Fig.33 - Curvas do efeito do tempo nos caudais drenados.
- Fig.34 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais parciais medidos na galeria periférica.
- Fig.35 - Caudais parciais medidos na galeria periférica em Novembro de 1985.
- Fig.36 - Subpressões observadas no leque piezométrico P3.
- Fig.37 - Subpressões observadas no leque piezométrico P4.
- Fig.38 - Subpressões observadas no leque piezométrico P5.
- Fig.39 - Subpressões observadas no leque piezométrico P6.
- Fig.40 - Subpressões observadas no leque piezométrico P7.
- Fig.41 - Curvas de influência da temperatura nos caudais e subpressões medidos em piezômetros da galeria periférica.
- Fig.42 - Curvas de influência da temperatura em caudais e subpressões medidos em piezômetros da galeria de fundação G145.
- Fig.43 - Curvas de influência da pressão hidrostática nas subpressões medidas no leque piezométrico P3.
- Fig.44 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões medidos no leque piezométrico P4.
- Fig.45 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões medidos em piezômetros da galeria de fundação G145.
- Fig.46 - Análise piezométrica. Gráficos interpretativos das subpressões e dos caudais.
- Fig.47 - Curvas do efeito do tempo no caudal e subpressão medidos no piezômetro P3-1CM.
- Fig.48 - Curvas do efeito do tempo nos caudais e subpressões medidos nos piezômetros do leque P4.
- Fig.49 - Curvas do efeito do tempo nos caudais e subpressões medidos em piezômetros da galeria de fundação G145.

## Capítulo 5

- Fig.50 - Evolução da mineralização da água da albufeira entre 1977 e 1985.
- Fig.51 - Evolução das concentrações de alguns catiões na água da albufeira entre 1977 e 1985.
- Fig.52 - Evolução das concentrações de alguns aniões na água da albufeira entre 1977 e 1985.
- Fig.53 - Evolução de algumas características físico-químicas da água da albufeira entre 1977 e 1985.
- Fig.54 - Evolução dos teores em oxigénio dissolvido e em matéria orgânica na água da albufeira entre 1977 e 1985.
- Fig.55 - Caracterização química da água drenada em Novembro de 1985
- Fig.56 - Caracterização físico-química das águas drenadas pela galeria periférica em Novembro de 1985.
- Fig.57 - Caracterização físico-química das águas drenadas pela galeria de fundação G145 em Novembro de 1985.
- Fig.58 - Representação gráfica dos índices geoquímicos determinados em águas drenadas pela galeria periférica em Novembro de 1985.
- Fig.59 - Representação gráfica dos índices geoquímicos determinados em águas drenadas pela galeria de fundação G145 em Novembro de 1985.
- Fig.60 - Curvas de dissolução do cálcio e do magnésio em função do pH.
- Fig.61 - Relações entre as concentrações de sílica, cálcio e sódio e o pH.
- Fig.62 - Zonamento das condições de alteração do maciço de fundação relativas a Novembro de 1985
- Fig.63 - Taxas de dissolução para o total de sais dissolvidos.
- Fig.64 - Taxas de dissolução e de precipitação para o cálcio.
- Fig.65 - Taxas de dissolução para o sódio.
- Fig.66 - Balanços iónicos das águas drenadas pela galeria periférica.
- Fig.67 - Balanços iónicos das águas drenadas pela galeria de fundação G145.

## ÍNDICE DE QUADROS

### Capítulo 2

- Quadro 1 - Principais casos de deterioração de barragens e obras acessórias devidos á acção da água.
- Quadro 2 - Características químicas de águas percoladas em fundações de barragens de betão.
- Quadro 3 - Barragens afectadas por sismos.

### Capítulo 3

- Quadro 4 - Composição mineralógica das rochas existentes no local da barragem de Cahora-Bassa.
- Quadro 5 - Características mecânicas do maciço de fundação determinadas "in situ".
- Quadro 6 - Características mecânicas da rocha de fundação determinadas em laboratório.
- Quadro 7 - Características de corte e de deslizamento de diaclases determinadas em laboratório.
- Quadro 8 - Composição química das rochas de fundação estimada da sua composição mineralógica.
- Quadro 9 - Composição química de rochas das famílias de rochas existentes em Cahora-Bassa.
- Quadro 10 - Características da rede de drenagem da fundação da barragem.

#### Capítulo 4

Quadro 11 - Amplitudes do movimento das juntas medido com alongâmetro na base da barragem entre Janeiro de 1979 e Dezembro de 1985.

#### Capítulo 5

Quadro 12 - Índices e parâmetros geoquímicos das rochas e das águas drenadas.

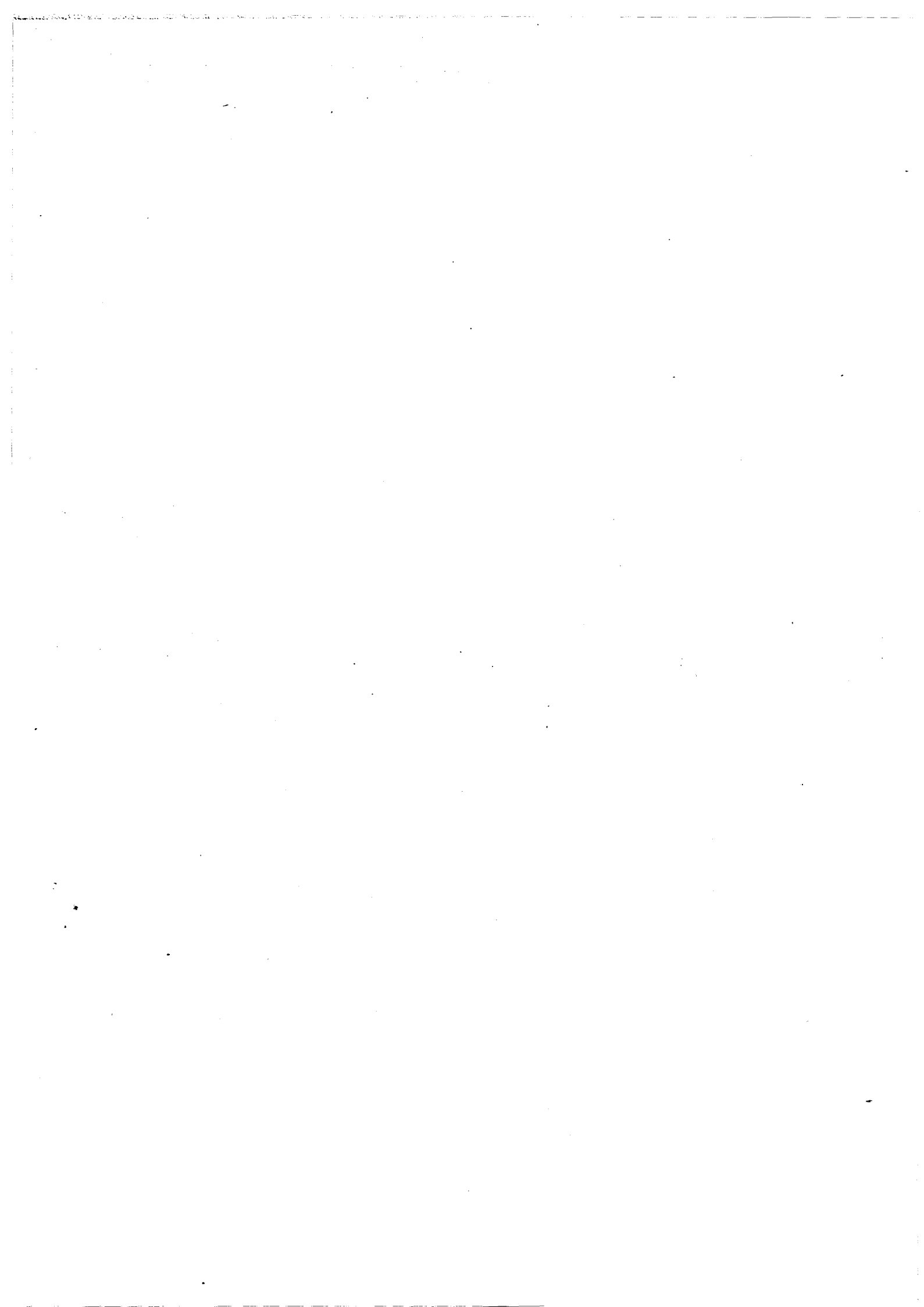
Quadro 13 - Valores dos caudais drenados e das taxas de arraste em solução reportadas a Novembro de 1985.

PARTE I

"CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS PRINCIPAIS ACÇÕES E EFEITOS  
E SOBRE AS METODOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO"

CAP 1 - INTRODUÇÃO

CAP 2 - GENERALIDADES SOBRE O FUNCIONAMENTO HIDROMECÂNICO  
DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO.



## 1 - INTRODUÇÃO

No presente trabalho, sobre o estudo do comportamento de fundações de barragens de betão, visam-se três objectivos:

i) o primeiro, e objectivo fundamental, pretende, de uma forma global, estudar o comportamento hidro-mecânico da fundação de uma barragem de betão com base nos dados de observação; ii) o segundo respeita á utilização nesse estudo de modelos simplificados de interpretação quantitativa para análise das subpressões e dos caudais drenados; e iii) o terceiro objectivo visa a integração nesse estudo de metodologias de observação, interpretação e análise da alteração físico-química dos materiais baseadas em técnicas de natureza hidrogeoquímica.

As acções da água são de grande importância para o comportamento das obras, pelo seu carácter de permanência e pela actuação das forças que originam nas respectivas estruturas (barragem e fundação), bem como da sua potencial influência sobre as propriedades dos materiais que as compoem (betão e maciço rochoso).

Por esse motivo, a água toma neste trabalho um lugar central, pretendendo-se assim realçar, através da análise e interpretação dos dados de observação, as várias formas de que se reveste a sua acção sobre os materiais e as estruturas.

É assim natural que um enfoque especial seja dado aos aspectos hidráulicos (subpressões no maciço de fundação e caudais) e hidrogeoquímicos (composição da água da albufeira e da água de percolação).

A Barragem de Cahora Bassa foi a escolhida para este estudo.

Não o foi por mero acaso, mas porque desde 1977 que se estabeleceu um programa complementar de observação visando a análise sistemática da qualidade da água da albufeira com vista a despistar a evolução da sua potencial acção química sobre os materiais, e designadamente sobre os betões e o maciço de fundação, na sequência de estudos elaborados numa fase prévia á construção da barragem sobre a alterabilidade dos materiais da fundação (LNEC 1968; LNEC 1973).

Infelizmente este programa não foi integralmente cumprido, porquanto a observação da qualidade da água percolada não teve

seguimento até 1985, não tendo sido, por esse motivo, possível avaliar de forma mais desejável os efeitos dessa acção sobre os referidos materiais.

O programa, em si, para além de reflectir uma preocupação normal pela observação do comportamento estrutural e hidráulico da obra, tinha a ver, também, com a localização da barragem. Cahora-Bassa situa-se numa das zonas do globo onde a alteração química dos materiais atinge maior relevo. Na verdade, dadas as condições climáticas (elevadas temperaturas e pluviosidade), características de zona tropical, seria interessante avaliar estes aspectos e eventualmente fazer a sua análise comparativa com situações decorrentes de outras obras situadas em zonas sujeitas a menor intensidade de alteração química, como sejam as barragens europeias (zona de clima temperado).

No segundo capítulo fazem-se algumas considerações gerais e muito sucintas sobre a problemática das acções e dos correspondentes efeitos sobre os materiais e as estruturas, em especial dos maciços de fundação de barragens de betão, com particular realce para os fenómenos resultantes da percolação da água, nomeadamente os de natureza físico-química.

Os capítulos seguintes (3, 4, 5 e 6) respeitam exclusivamente à barragem de Cahora Bassa, neles se fazendo a descrição do empreendimento e das suas principais características (Cap.3), o estudo do comportamento hidromecânico da fundação (onde se aborda o desenvolvimento e aplicação de modelos estatísticos simplificados para interpretação do comportamento hidráulico-subpressões e caudais) (Cap.4), o estudo hidrogeoquímico (onde se abordam também questões relacionadas com a alteração dos materiais da fundação) (Cap.5) e as considerações finais (que incluem também uma breve referência às perspectivas de desenvolvimento e aplicação futura das metodologias descritas) (Cap.6).



## 2 - GENERALIDADES SOBRE O FUNCIONAMENTO HIDROMECAÂNICO DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO.

### 2.1 - Influência da água na deterioração das barragens

Uma barragem, sendo uma obra organizada nos seus vários elementos a níveis energéticos elevados, fará concentrar sobre si os factores resultantes da sua própria dinâmica (alternância de estados energéticos) e a acção dos factores relacionados com acções externas.

A evolução do ambiente natural processa-se normalmente (quando não existe interferência de factores antrópicos) a taxas geológicas. Ao nível da escala humana estar-se-ia perante uma situação de quase equilíbrio (Rodrigues 1984).

A construção de uma barragem implica uma alteração rápida das condições do ambiente biofísico, que começa com as escavações e prossegue com a instalação e exploração da obra e da albufeira.

Alteram-se os factores de ordem climática e os das ordens da geodinâmica externa (geohidrológicas, erosivas e sedimentológicas, geotectónicas e biológicas). Em consequência surge uma alteração quantitativa, e por vezes também qualitativa, a nível local sobre os materiais e as estruturas.

A deterioração aparece, assim, como uma consequência natural da evolução no sentido do estabelecimento de estados de energia mínima e de maior desordem. As taxas com que se manifesta dependem, obviamente, de factores intrínsecos devidos aos materiais e às estruturas e extrínsecos devidos às acções.

As acções de natureza físico-mecânica e química da água têm papel de relevo nos processos de deterioração dos materiais e das estruturas. As primeiras resultando de (ou em) tensões aplicadas (estruturais ou hidráulicas) e as segundas resultando da natureza dos materiais e da água de contacto (Rodrigues 1978).

Tentamos ilustrar seguidamente, embora de forma não exaustiva, a sua quota de responsabilidade nesses processos. Para o efeito socorremo-nos do registo de casos de deterioração elaborado pelo Comité de Deterioração de Barragens e Reservatórios (CDDR), datado LNEC-Proc. 43/13/9208

de Outubro de 1981, onde se relatam os casos inventariados até final de 1975 (ICOLD 1981).

Dos 1105 casos de deterioração aí descritos, 664 correspondem a barragens de aterro, 438 a barragens de betão e de alvenaria e 3 a barragens mistas (aterro-betão/alvenaria). Mas destes casos consideramos somente os correspondentes ao corpo e fundação da obra, com a seguinte distribuição: 432 correspondem a barragens de aterro (terra e enrocamento); 296 correspondem a barragens de betão e alvenaria; e 330 correspondem a obras acessórias (respeitantes indistintamente aos tipos de barragens mencionadas).

As situações analisadas respeitam somente a aspectos da deterioração em que de alguma forma existe intervenção da água. Escolheram-se, assim, para os casos de deterioração da fundação, as situações decorrentes de percolação, erosão interna, degradação e subpressão. Para o corpo da barragem, escolheram-se as situações relacionadas com as acções da água sobre os materiais: reacção entre constituintes do betão ou da argamassa de alvenaria (incluindo a reacção alcali-inerte) reacção entre os constituintes do betão ou da argamassa de alvenaria e o meio ambiente (incluindo a dissolução do hidróxido de cálcio); ataque por fungos e bactérias; permeabilidade e percolação; alteração da pedra de alvenaria, do riprap ou do enrocamento; solubilização e expansibilidade dos solos; e alteração bioquímica dos aços (obras acessórias).

No quadro 1 e na Fig. 1 indica-se o número de casos de deterioração registados de acordo com aqueles itens em barragens de betão, de aterro e de alvenaria e nas obras acessórias.

Da sua breve análise, a primeira constatação a fazer é a de que dos 1058 casos de deterioração analisados, 547 (52%) respeitam aos itens acima indicados. Quer isto dizer que, de facto, a intervenção da água, só por si, tem uma importância extraordinária no desenvolvimento dos processos de deterioração.

Desses 547 casos, 305 (56%) correspondem a deteriorações na fundação e 242 (44%) a deteriorações no corpo das obras (barragens e obras acessórias).

Relativamente à deterioração das fundações, o maior número de casos registados respeita a barragens de aterro (173 casos), seguido das obras acessórias (61 casos), das barragens de betão (55 casos) e, finalmente, das barragens de alvenaria (16 casos). A

incidência deste tipo de deterioração por classes de obra é assim de 40% nas barragens de aterro (num total de 432 casos de deterioração considerados), de 24% nas barragens de betão e de alvenaria (num total de 296 casos) e de 18% nas obras acessórias (num total de 330 casos).

Quadro 1 - Principais casos de deterioração de barragens e obras acessórias devidos á acção da água.

FUNDAÇÃO	Betão		Aterro		Alvenaria		Obras Acessórias		TOTAL	
Percolação	21	38,2	117	67,6	10	62,5	23	37,7	171	56,1
Erosão interna	16	29,1	46	26,6	1	6,3	30	49,2	93	30,5
Degradação	1	1,8	10	5,8	0		4	6,6	15	4,9
Subpressão	17	30,9	0		5	31,2	4	6,6	26	8,5
TOTAL	55	100,0%	173	100,0%	16	100,0%	61	100,0%	305	100,0%
MATERIAIS	Betão		Aterro		Alvenaria		Obras Acessórias		TOTAL	
Reacção entre os constituintes	20	27,0			0		2	9,1	22	9,1
Reacção destes com o ambiente	26	35,1			23	69,7	5	22,7	54	22,3
Ataque por bactérias	0				0		2	9,1	2	0,8
Permeabilidade	28	37,8			10	30,3	3	13,6	41	16,9
Solos solúveis			1	0,9					1	0,4
Solos expansivos			1	0,9					1	0,4
Rochas decompostas			3	2,6					3	1,2
Rochas alteráveis			2	1,3					2	0,8
Percolação			106	93,8					106	43,8
Alteração da pedra					0		0			
Acção sobre os aços							10	45,5	10	4,1
TOTAL	74	99,9%	113	100,0%	33	100,0%	22	100,0%	242	99,8%
FUNDAÇÃO	55	43	173	60	16	33	61	73	305	56
MATERIAIS	74	57	113	40	33	67	22	27	242	44
TOTAL	129	100%	286	100%	49	100%	83	100%	547	100%

O maior contributo é dado precisamente pelos casos relacionados com a percolação e a erosão interna e, bastante distanciados em número, os relacionados com a subpressão e a degradação (incluindo expansão).

Relativamente à deterioração dos materiais do corpo das estruturas, o maior número de casos corresponde também às barragens de aterro (113 casos), seguido das barragens de betão (74 casos), das barragens de alvenaria (33 casos) e, finalmente, das obras acessórias (22 casos). A incidência destes tipos de deterioração por classes de obra é de 26% para as barragens de aterro (num total de 432 casos de deterioração considerados), de 36% para as barragens de betão e de alvenaria (num total de 296 casos) e de 7% para as obras acessórias (num total de 330 casos).

Um outro aspecto com interesse é o que se prende com a idade das obras em que ocorrem as deteriorações da natureza das que temos vindo a tratar.

Na Fig. 1 discriminam-se por classe de obra e tipo de deterioração os casos anteriormente descritos e o período de vida da obra em que ocorreram.

Além dos casos cuja data de ocorrência se desconhece, os períodos considerados no inventário elaborado pela CDDR, já referenciado, correspondem às fases de construção, de primeiro enchimento dos reservatórios e de serviço posterior aos primeiros cinco anos.

Analizam-se de seguida os casos de deterioração da fundação.

Relativamente às barragens de betão, o maior número de deteriorações diz respeito a fenómenos relacionados com a percolação e com a erosão interna. A sua ocorrência registou-se predominantemente durante o primeiro enchimento. Existe ainda um número elevado de casos relacionados com a percolação, cuja data de ocorrência se desconhece. A maioria dos casos de deterioração devidos à subpressão ocorre depois dos primeiros cinco anos de serviço das obras e são secundados pelos casos cuja data de ocorrência é desconhecida.

Nas barragens de alvenaria predominam as deteriorações relacionadas com a percolação, observando-se uma grande incidência de casos cuja data de ocorrência é desconhecida, seguida de casos ocorridos depois dos primeiros cinco anos de serviço.

Quanto às barragens de aterro, onde são largamente majoritários os casos de deterioração decorrentes da percolação, verifica-se, tal como nas barragens de betão, uma predominância de ocorrências durante o primeiro enchimento. As deteriorações devidas à erosão interna fogem um pouco a esta regra, distribuindo-se regu-

larmente pelos períodos de primeiro enchimento e posteriores.

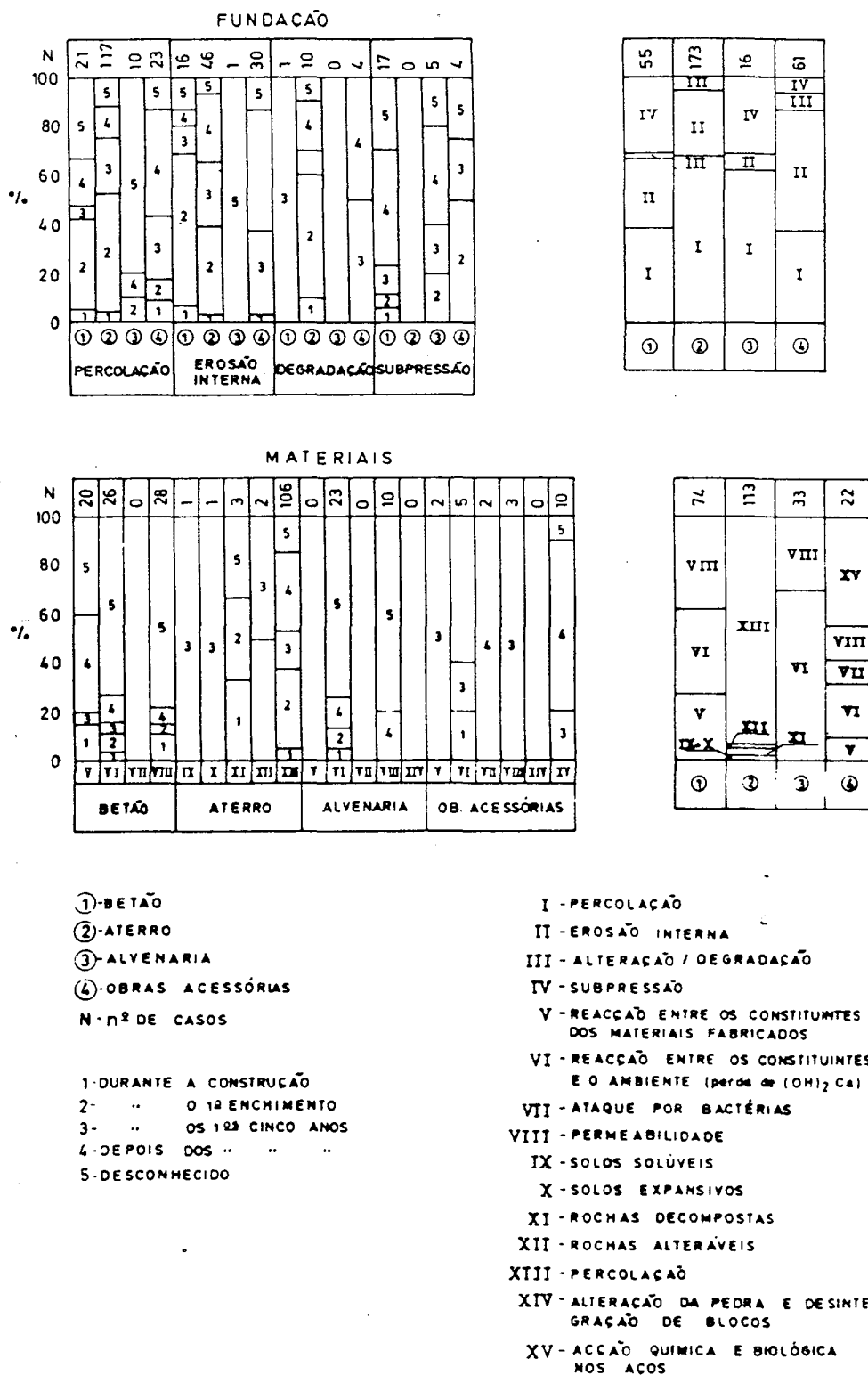


Fig. 1 - Caracterização das principais deteriorações observadas em barragens devidas à acção da água.

Nas obras acessórias, onde se regista uma predominância de deteriorações relacionadas também com a percolação e a erosão interna, observa-se uma incidência maioritária de casos após os primeiros cinco anos de serviço das obras.

No que concerne à deterioração dos materiais que constituem o corpo das estruturas, referem-se a seguir os aspectos mais relevantes.

Praticamente para todas as classes de obras consideradas, a maior incidência de deteriorações verifica-se nos primeiros cinco anos de serviço (barragens de aterro), em períodos posteriores (obras acessórias) ou em períodos desconhecidos (barragens de betão e de alvenaria). É natural que muitos dos casos incluídos no grupo relativo a datas de ocorrência desconhecida sejam resultado de fenómenos cujo desenvolvimento apresente taxas de progressividade que tornem difícil a sua identificação temporal. De facto, são os casos de deterioração relativos a reacções químicas entre os materiais e o ambiente e a fenómenos associados à permeabilidade que maior contributo dão áquele grupo. Na realidade, estes tipos de fenómenos têm, geralmente, um processo lento e progressivo de desenvolvimento.

Nas barragens de betão pontificam as deteriorações devidas à permeabilidade seguidas de muito perto, e em percentagens quase idênticas, das deteriorações devidas à reacção entre os constituintes do betão e das argamassas e o ambiente (incluindo a perda de hidróxido de cálcio) e das deteriorações devidas à reacção entre os constituintes dos materiais fabricados (geralmente betões e argamassas).

Nas barragens de alvenaria ocorreram somente deteriorações devidas à reacção entre os constituintes e o meio ambiente (as mais numerosas) e devidas a outros fenómenos associados à permeabilidade.

Nas barragens de aterro dominam quase exclusivamente as deteriorações devidas a fenómenos de percolação.

Nas obras acessórias o maior número de casos prende-se com deteriorações provocadas pela acção química e biológica nos aços das estruturas, seguindo-se os casos resultantes da reacção dos constituintes dos materiais (entre si e com o meio ambiente) e da permeabilidade.

São as reacções químicas entre os constituintes do betão e das argamassas e os fenómenos relacionados com a permeabilidade que maior peso têm na deterioração do corpo das barragens de betão e de alvenaria; nas barragens de aterro são determinantes fenómenos relacionados com a percolação através do corpo da barragem; e nas obras acessórias revela maior importância a acção química e biológica nos aços, seguida da reacção química entre os constituintes do betão e o ambiente.

Fica, assim, demonstrada a elevada importância que adquire a capacidade de intervenção da água nos processos de deterioração. E, desta forma, também o interesse com que deve ser encarado o estudo e desenvolvimento de metodologias adequadas para: i) a definição dos materiais a utilizar; ii) o despiste e controlo dos fenómenos de deterioração e a sua evolução (sistemas de observação); e iii) definição de medidas preventivas e de reparação.

## 2.2 - Principais acções e efeitos

Na sequência dos aspectos referidos no número anterior, em que, como se evidenciou, a deterioração ocupa lugar importante, tecem-se, em seguida, algumas considerações breves sobre as principais acções e efeitos associados ao funcionamento hidromecânico dos maciços rochosos de fundação, dado este constituir o quadro de referência para análise e interpretação dos fenómenos apontados e procura das soluções adequadas.

As principais acções com implicações directas no funcionamento hidromecânico são (Mascarenhas 1979; Florentino 1983; Pedro 1987): os esforços induzidos pela superestrutura (barragem) e obras anexas, as acções da água, as variações de temperatura, as acções sísmicas e outras (acções tectónicas, acções induzidas por obras vizinhas, escavações, taludes, descarregamentos, etc.)

### 2.2.1 - Esforços induzidos

Os esforços induzidos pela superestrutura resultam, inicialmente, da instalação do peso próprio do betão da barragem, e, depois da sua monolitização e entrada em funcionamento, dos deslocamentos impostos no contacto estrutura-macício de fundação.

A observação destas acções é, geralmente, feita através da

quantificação do peso da superestrutura (peso próprio do betão), da medição do estado de tensão em pontos da base da barragem, directamente através de tensómetros ou indirectamente através de extensómetros e outros métodos de libertação e de compensação de tensões, e, também, da medição de deslocamentos de pontos da base da barragem através de fios de prumo, de varões ou fios extensométricos, de clinómetros (rotação) ou de métodos geodésicos (planimetria e altimetria).

Os principais efeitos decorrentes destas acções são a modificação do estado de tensão no maciço de fundação, a eventual intensificação da fracturação, deslocamentos internos e alteração das condições de funcionamento hidráulico.

Todos ou alguns destes efeitos poderão contribuir para a alteração das condições de estabilidade da obra e, conseqüentemente, dos seus níveis de segurança.

## 2.2.2 - Acções da água

### 2.2.2.1 - Pressão hidrostática

Consideramos a pressão hidrostática como o impulso sobre as estruturas (barragem e fundo do reservatório) resultante da coluna de água instalada a montante após a constituição da albufeira, e, eventualmente, a jusante, devido a descargas, bacias de dissipação e outras albufeiras.

A avaliação dessa acção baseia-se na medição da altura da coluna líquida e do peso específico da água (geralmente  $1 \text{ g/cm}^3$ ).

Em relação á fundação, a pressão hidrostática provoca, numa primeira fase, a alteração das condições de fluxo no maciço rochoso devida à geração de gradientes hidráulicos e a aplicação de uma carga estática de elevado valor à fundação que se traduzem geralmente em deslocamentos e tensões no maciço rochoso. Posteriormente, as variações da pressão hidrostática, devidas ao regime de exploração da albufeira, vão traduzir-se em variações daquelas grandezas.

### 2.2.2.2 - Subpressão

A subpressão, na fundação ou na base da barragem, resulta da impulsão da água existente ao longo das descontinuidades do maciço



rochoso ou do contacto betão-rocha e é função da forma como se reflecte a pressão hidrostática (água da albufeira ou da bacia a jusante) nessas zonas. A forma como se processa essa ligação depende sobretudo das características hidráulicas do meio (trama das descontinuidades) gerando-se zonas com potenciais hidráulicos distintos. Os seus valores evoluirão em função de vários factores ou de outras acções, designadamente: pressão hidrostática, estado de tensão imposto ao maciço, viscosidade da água e alteração das características hidráulicas das descontinuidades condutoras (aumento ou diminuição do calibre por erosão ou colmatação, respectivamente, e alteração da rugosidade).

A medição da subpressão é feita através de piezómetros simples (furo total) ou múltiplos (furo dividido em câmaras independentes).

#### 2.2.2.3 - Acções da percolação

i) A percolação da água estabelece-se na fundação sobretudo devido à existência de descontinuidades e de gradientes de pressão motivada por potenciais hidráulicos diferentes (Mascarenhas 1979). Forças de natureza capilar e osmótica, embora importantes sob o ponto de vista da migração da água através dos materiais, não apresentam grande significado no condicionamento de fluxos hidráulicos importantes.

Para além de forças mássicas que são transmitidas ao maciço, resultam ainda do escoamento acções mecânicas e químicas sobre os materiais com os quais a água contacta.

As acções mecânicas são motivadas predominantemente pelas forças de atrito no contacto da água com as superfícies que a contêm e dependem primordialmente do estado de agregação dos materiais e da velocidade do fluxo. Quer isto dizer que variam, para um dado maciço (meio), numa relação directa com o caudal percolado. Os caudais que atravessam o maciço de fundação são geralmente quantificados através da sua medição à saída de drenos instalados na base da barragem ou no pé de jusante.

A consequência principal desta acção é o arraste em suspensão das partículas arrancadas ao meio. O seu destino é, geralmente, o exterior da fundação, o fundo dos furos de drenagem ou a rede de fracturas de menor calibre que servem de filtro. Como efeitos se-

cundários do arraste mecânico podem adivinhar-se: aumento dos caudais percolados devido ao aumento de calibre das fracturas; diminuição dos caudais por obstrução da rede de drenagem e, consequentemente, aumento da subpressão no maciço; diminuição dos caudais por autocolmatação do maciço e eventual aumento ou redução do nível de subpressão consoante as zonas atingidas pelo fenómeno.

ii) Se exceptuarmos os maciços rochosos de elevada solubilidade (gessíferos, calcários, dolomíticos e basálticos), a escala temporal a que se desenvolvem os fenómenos químicos nos maciços mais utilizados para fundação de barragens no nosso país (graníticos e xistosos - filádios e grauvaques, por vezes em série flyshoi-de) não é de molde a criar no espírito das pessoas a necessidade de os considerar como factor importante na definição de cenários de deterioração e na avaliação dos consequentes níveis de risco.

Na realidade, os fenómenos de deterioração que se têm revelado mais acusadamente nos maciços de fundação, e até no corpo das barragens, têm tido uma motivação predominantemente físico-mecânica; na generalidade decorrente da acção dos esforços e deslocamentos induzidos no maciço pelo funcionamento estrutural da barragem.

A Fig. 2, que mostra a evolução dos caudais percolados na fundação de uma barragem (Venda Nova - Portugal) e a evolução das

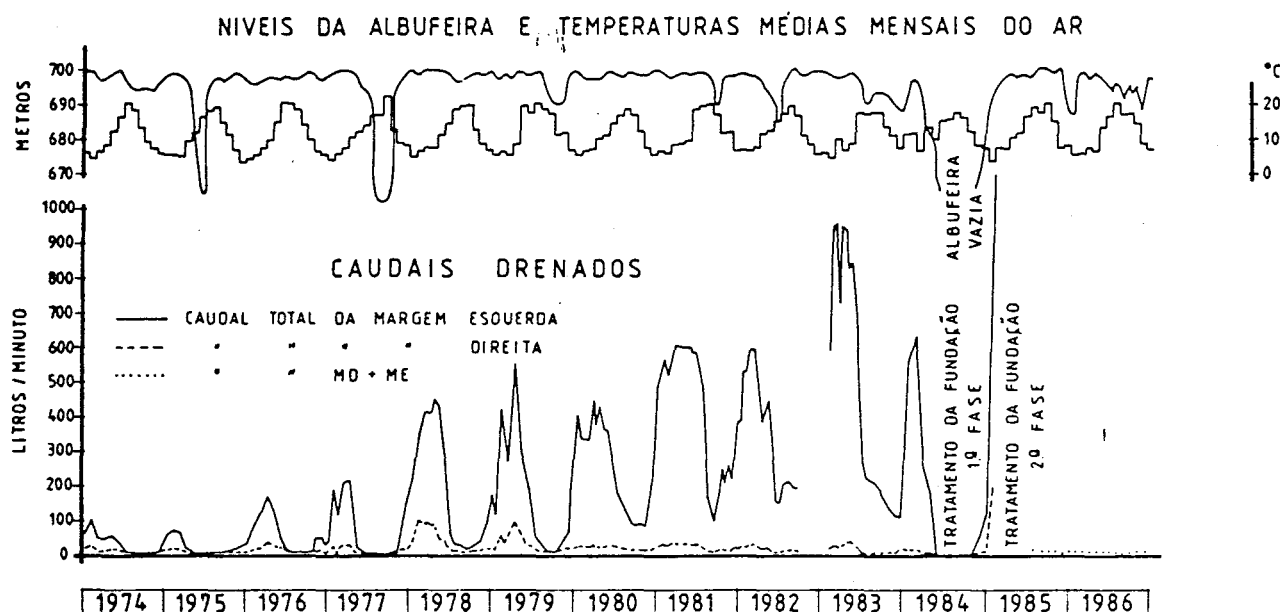


Fig. 2 - Caudais totais drenados na fundação da barragem da Venda Nova entre 1974 e 1986.

temperaturas médias mensais do ar, é elucidativa a respeito da predominância das acções físico-mecânicas no aumento progressivo dos caudais drenados (Silva e Bravo 1987). Salienta-se que o nível da albufeira se manteve com pequenas oscilações durante o período em causa.

No entanto, quer a montante destes fenómenos de deterioração físico-mecânica, quer, e com maior intensidade, a jusante deles, desenvolvem-se fenómenos de deterioração química. Basta, para isso, que, para além do estado de saturação do maciço, se facilite a circulação de água no interior das fracturas.

Como se sabe, a resistência mecânica de um material varia com o seu estado de alteração.

É, assim, lógico que, a prazo, o desenvolvimento dos fenómenos químicos, a partir das superfícies das discontinuidades (fracturas e zonas de maior permeabilidade) para o interior da matriz rochosa, provoque estados progressivos de alteração que darão origem a características diferenciais de resistência.

Da acção conjugada dos dois tipos de fenómenos, os físico-mecânicos e os químicos, é, portanto, natural que resulte a intensificação da deterioração e, de uma forma progressiva, das condições favoráveis ao desenvolvimento de novas fracturas e ao aumento da permeabilidade do maciço, com o conseqüente agravamento dos níveis de subpressão e de caudais percolados. Desenvolver-se-á, desta forma, um processo em círculo, cujo raio irá progressivamente aumentando até à tomada de decisão que permite travar o processo.

Claro que estes aspectos estão intimamente relacionados com o tipo de barragem, o regime de exploração da albufeira e as características litológicas, petrográficas e estruturais do maciço de fundação.

Paralelamente, ocorrem fenómenos muito localizados de degradação mecânica de produtos utilizados em consolidação e impermeabilização, a qual abre caminho à sua posterior alteração química e arraste, diminuindo a respectiva eficiência e, conseqüentemente, o efeito reparador que geravam ou deviam gerar.

A quantificação do material arrastado para o exterior do maciço pode ser feita à saída dos drenos (por filtragem ou por cubicação em tinas de decantação) ou no interior dos furos de drenagem. É, geralmente, um processo delicado, sujeito a muitos erros, e de

avaliação por defeito.

A sua identificação mineralógica é feita, normalmente, através de raios X e a sua caracterização química é feita por processos químicos analíticos ou por espectrofotometria.

iii) As acções químicas derivadas da percolação resultam prioritária e maioritariamente da actuação da água como solvente. A sua capacidade solubilizadora para um determinado material (reação química entre os materiais envolventes e a água) é controlada por vários factores, dos quais se salienta: a concentração de substâncias em solução (tipo e quantidade de sais dissolvidos), a temperatura, a pressão, o pH (Fig. 3) e o potencial redox. Para além das reacções químicas de solubilização podem ainda surgir, consoante o tipo de iões em solução e as características mineralógicas do material (rocha ou betão), reacções de outra natureza como sejam as electroquímicas e as de formação de produtos expansivos (hidrólise e reacções alcali-inerte, p.ex:).

A avaliação do potencial agressivo da água de percolação faz-se medindo as características da água da albufeira (potencial água de infiltração) por recurso a análises "in situ" e de laboratório.

O principal efeito desta acção agressiva da água é a alteração do material com que contacta. Trata-se, naturalmente, de um processo moroso cujas taxas variam, para determinadas características da água, em função das propriedades intrínsecas do material.

A composição das águas subterrâneas, e em boa parte também das de superfície, é condicionada pelas formações geológicas atravessadas ou de contacto.

A água das chuvas é, na generalidade dos casos, pouco mineralizada e, por consequência, possuidora de moderado potencial agressivo. Acontece, por vezes, que esse potencial agressivo é aumentado pela dissolução de gases atmosféricos tais como dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), os quais transformam a água das chuvas em ácidos mais ou menos diluídos.

Estas características da água das chuvas, aliadas às características dos materiais atravessados (rochas, solos e materiais antrópicos), condicionam a evolução da qualidade da água (sua composição) ao longo das fases terrestres do ciclo da água (fluxo superficial e fluxo subterrâneo).

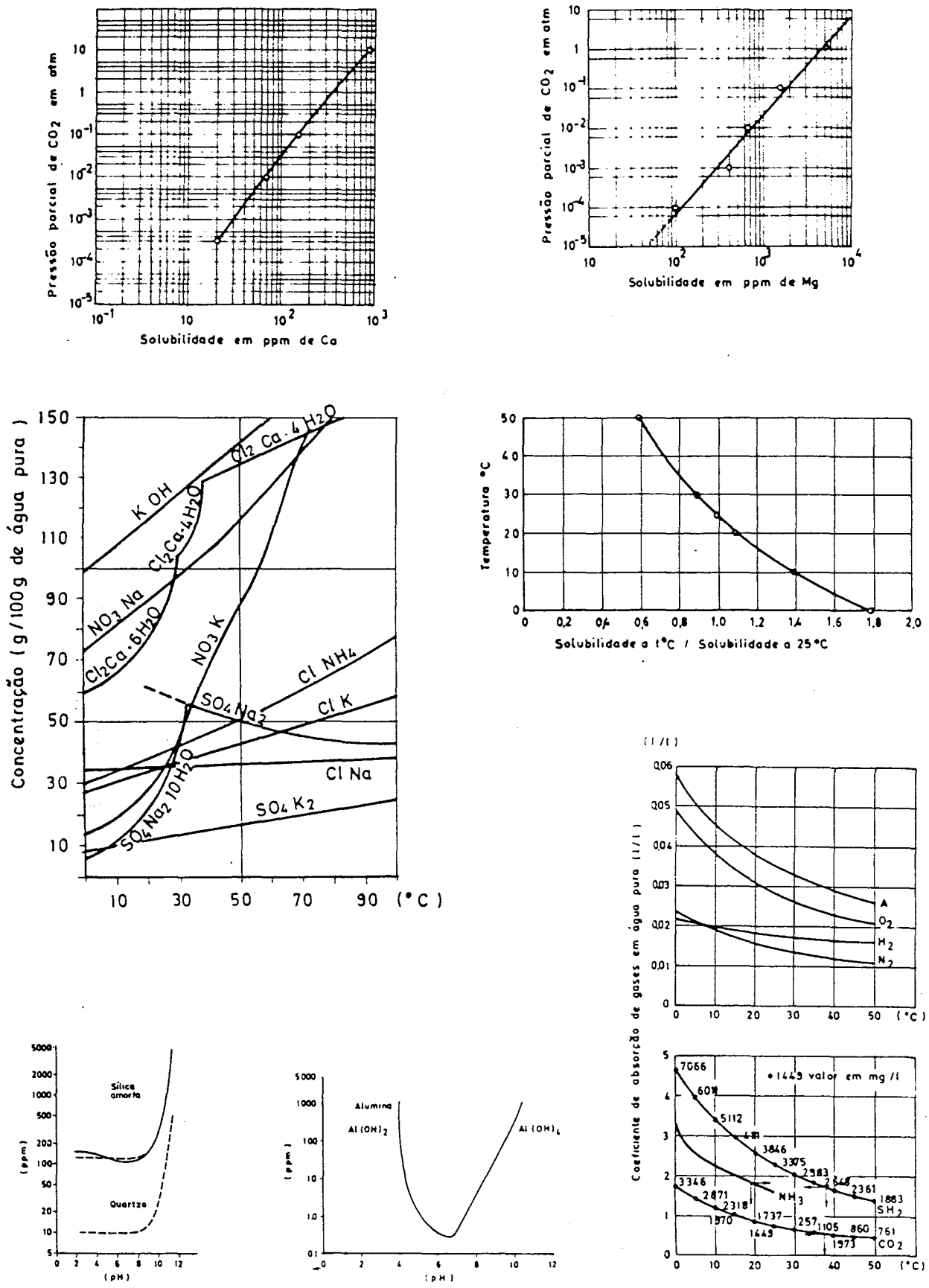


Fig. 3 - Influência da pressão de CO<sub>2</sub>, da temperatura e do pH na solubilidade de algumas substancias (Custódio 1976; Krauskopf 1972).

Assim, a alteração química dos materiais é condicionada pelas suas propriedades intrínsecas (composição química e associação mineralógica, estrutura cristalina, porosidade e permeabilidade) e pelas propriedades extrínsecas atribuíveis a factores actuantes (composição da água, temperatura, pressão, caudal de percolação) - (Rodrigues, 1975).

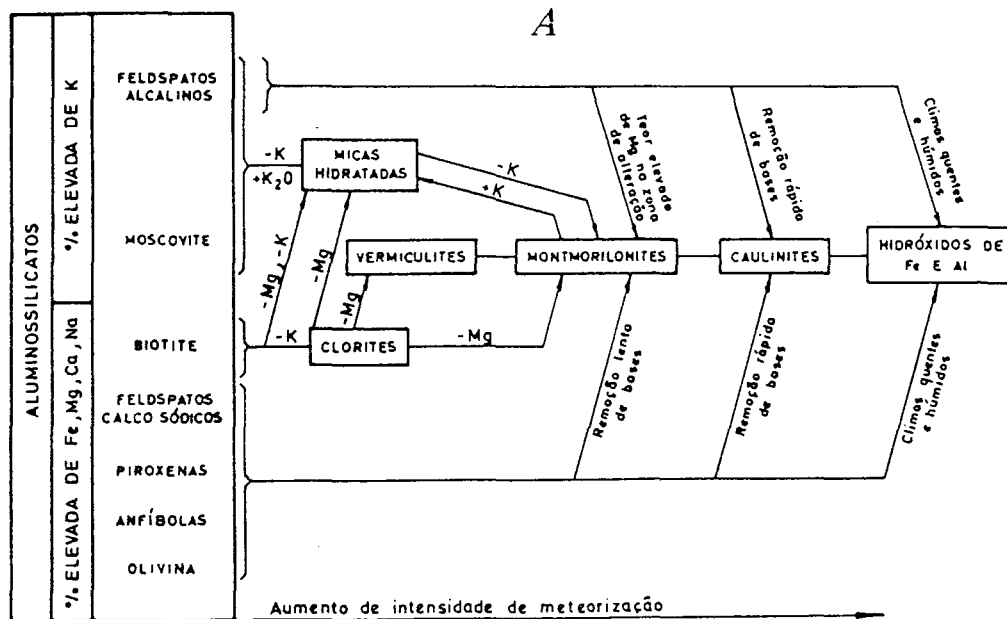
Como consequência, a composição da água vai enriquecendo em determinados iões, de acordo com as dinâmicas dos equilíbrios químicos que pontualmente se vão estabelecendo em face da diversidade de iões presentes e das condições do meio.

Através da Fig. 4 (gráfico A) pretendeu-se ilustrar de forma muito resumida e esquemática uma sequência lógica da alteração dos minerais silicatados e, conseqüentemente, das rochas que os contém. Na mesma figura (gráfico B), indicam-se os minerais, constituintes essenciais das rochas mais frequentemente utilizadas em fundações de barragens, que estão na origem dos sais dissolvidos nas águas das albufeiras e, sobretudo, nas águas de percolação através dos maciços de fundação.

Ainda, na mesma figura, indica-se o escalonamento de resistência à meteorização química de alguns minerais (séries de Goldich). Daqui se pode inferir para determinados tipos de rocha os seus graus de alterabilidade relativos.

Em fundações de barragens, como consequência da alteração, podem resultar: o aumento da permeabilidade do meio devido à solubilização e arraste para o exterior dos sais em solução e, em função disso, o aumento da percolação e, eventualmente, da subpressão; a diminuição da permeabilidade devido à precipitação dos sais na rede de fracturas a jusante ou na rede de drenagem, originando a redução da percolação e o eventual aumento ou diminuição da subpressão; a progressiva ruína dos edifícios cristalinos dos minerais e abaixamento dos níveis de coesão e de resistência intergranular do material (rocha ou betão) (diminuição da resistência ao corte da rocha e ao deslizamento de diaclases).

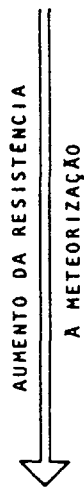
iv) Relativamente aos efeitos observados da acção química através da água percolada referem-se, a propósito, alguns números relativos a quantidades de sais dissolvidos e a caudais percolados na fundação de 13 barragens portuguesas; 6 têm fundação em formações xistosas e 7 em formações graníticas (Quadro 2).



SÉRIES DE GOLDICH

B

olivina  
diópsido  
hiperstena  
augite  
zoizite  
esfena  
horneblenda  
epídoto  
magnetite  
ilmenite  
apatite  
biotite  
granadas  
turmalina



Feldspato potássico  
Moscovite  
Quartzo

Nefelina  
Plagioclase cálcica  
Plag. calco-sódica  
Plag. sodo-cálcica  
Plag. sódica

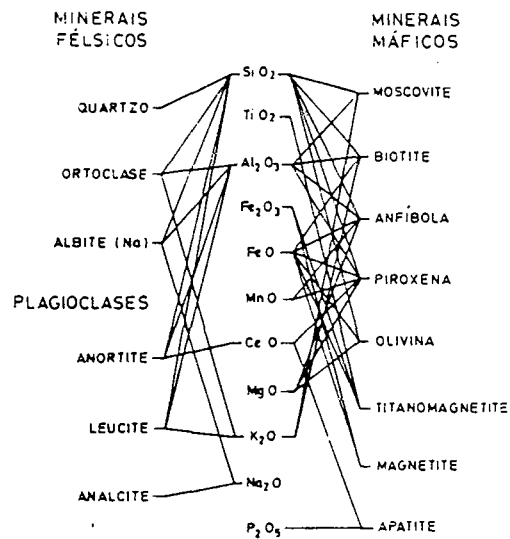


Fig. 4 - Influência da drenagem e do clima na alteração dos minerais mais comuns (A) e produtos usuais da alteração (B) (adaptado de Barros 1971).

Trata-se de valores médios correspondentes a cerca de 474 análises químicas efectuadas à água debitada por drenos e aos caudais neles registados.

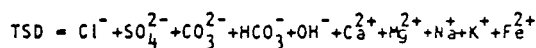
Os valores aqui apresentados sob forma estatística não incluem o rigor científico que necessariamente deve presidir a este tipo de análise. Resta, porém, é essa a intenção, a percepção de que os fenómenos de alteração química apresentam variantes significativas consoante o tipo litológico e petrográfico do maciço de fundação, e se quisermos, até, consoante o tipo da superestrutura, para além de outros factores condicionantes (regime de exploração, qualidade da água, desflorestação, etc.).

Quadro 2 - Características químicas de águas percoladas em fundações de barragens de betão.

		SAIS DISSOLVIDOS VALORES MÉDIOS mg/l					SAIS DISSOLVIDOS VALORES MÉDIOS kg/Ano			
BARRAGEM	LITOLOGIA	TSD	Mg+Na+K	Ca	CAUDAL MÉDIO l/m	BARRAGEM	LITOLOGIA	TSD	Mg+Na+K	Ca
A	<i>mm</i>	127	24	26	0.8	A	<i>mm</i>	53	10	11
B	<i>mm</i>	149	26	25	1.2	B	<i>mm</i>	94	16	16
C	<i>mm</i>	415	117	26	0.8	C	<i>mm</i>	174	49	10
D	<i>mm</i>	240	42	9	1.3	D	<i>mm</i>	164	29	7
E	<i>mm</i>	53	44	-5	0.2	E	<i>mm</i>	6	5	1
F	<i>mm</i>	98	26	4	0.4	F	<i>mm</i>	21	5	1
G	+++	96	12	25	21.5	G	+++	1097	135	180
H	+++	27	1	5	22.0	H	+++	508	12	66
I	+++	99	6	34	15.1	I	+++	785	45	272
J	+++	118	13	23	0.8	J	+++	50	6	10
K	+++	49	21	9	0.2	K	+++	5	2	1
L	+++	123	17	11	1.8	L	+++	115	16	11
M	+++	40	3	7	5.0	M	+++	105	5	20

$\mu; \nu$	<i>mm</i>	160;0.7	40;0.7	14;0.9	0.8;0.6
	+++		79;0.5	10;0.7	16;0.6

$\mu; \nu$	<i>mm</i>	85;0.8	19;0.8	8;0.7
	+++		352;1.1	33;1.3



*mm* FILÁDIO, GRAUVAQUE

+++ GRANITO

COEF. DISP. = DSP/MÉDIA

$$\nu = \pi / \mu$$



É de salientar a aparente maior alterabilidade das formações xistosas. Esse facto ficar-se-á a dever, naturalmente, à maior superfície de contacto da água com a matriz rochosa, no caso dos xistos, já que esta apresenta maior permeabilidade intrínseca do que a dos granitos. Porém, os maiores volumes de água percolada nas fundações graníticas conduzem a maiores volumes de sais dissolvidos e arrastados. Geralmente, existe uma variação cíclica anual da composição química da água, mais ou menos acentuada, conforme a incidência da renovação da água na albufeira e as variações sazonais da biomassa e da temperatura, ocorrendo, também, uma variação diferida no tempo. Esta será função do endurecimento progressivo da água da albufeira, por um lado, e do aumento ou diminuição da superfície de contacto da água de percolação com os minerais da matriz rochosa, da qualidade dos preenchimentos das juntas e da subpressão, por outro.

Embora se trate de valores pontuais, apresentados sem grande rigor científico, como já se disse, eles permitem formar uma ideia da dimensão dos fenómenos químicos. Os seus efeitos nas condições hidráulicas e nas características mecânicas da fundação só a prazo, mais ou menos dilatado, se virão a fazer sentir.

Estes efeitos podem ser apercebidos, e de certa forma quantificados, através da determinação das características da água vertida pela rede de drenagem (análises "in situ" e em laboratório) e da identificação mineralógica (raios x) ou química (análise química e espectrofotométrica) dos produtos precipitados ou dos produtos expansivos retirados do meio atravessado.

v) A metodologia de análise tradicionalmente utilizada envolve a realização em laboratório de análises químicas completas de amostras de água colhidas nas obras e, por vezes, identificações mineralógicas, por difractometria de Raios X, de amostras de precipitados obtidos nas águas drenadas (Coelho 1984; Silva 1987).

Os ensaios a realizar em laboratório no âmbito dessa metodologia são dos tipos seguintes:

- pesquisa e quantificação dos iões ou óxidos principais com interesse geoquímico (em geral  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- resíduo sêco a  $105^\circ\text{C}$  e resíduo suspenso;
- pH, condutividade eléctrica, temperatura e potencial redox

(estas características devem ser também medidas no local, quando da colheita da água); e

- identificação mineralógica do filtrado de resíduo suspenso (através de raios X) sempre que a sua quantidade o justifique (somente nas águas drenadas).

Esta metodologia revela-se adequada para uma caracterização correcta, qualitativa e quantitativa da composição das águas. No entanto, ela pode tornar-se morosa e dispendiosa, dado o grande número de análises a realizar e, por vezes, as grandes distâncias a cobrir entre o local de colheita e o laboratório de análises; assim, é de encarar a utilização de metodologias alternativas, mais expeditas.

Uma metodologia alternativa, que tem vindo a ser experimentada no LNEC, apoia-se num número muito reduzido e esporádico de análises químicas completas por cada obra (geralmente 2 ou 3) e na medição "in situ" de algumas características físico-químicas das águas: pH, condutividade eléctrica, potencial redox e durezas (total e carbonatada). A fenomenologia físico-química em que se fundamenta esta metodologia é a seguinte:

- A condutividade eléctrica, para determinada água, depende da sua composição química - em especial da quantidade total de sais dissolvidos, representativa do ataque químico global da água aos materiais por ela atravessados - e da temperatura. Conhecida a respectiva correlação (determinada com base em duas ou três análises químicas completas ou a partir da determinação do resíduo sêco a 105°C das águas) torna-se expedito e fácil avaliar a composição química global de todas as águas drenadas e da albufeira através da medição da condutividade eléctrica e da temperatura.

- A dureza total representa as concentrações em cálcio e em magnésio existentes na água e a dureza carbonatada representa apenas a concentração de cálcio. As variações da concentração de cálcio, na generalidade das fundações das barragens portuguesas, são influenciadas sobretudo pela presença dos cimentos. E as variações da concentração de magnésio são, em regra, essencialmente influenciadas pela presença de alguns minerais constituintes da matriz rochosa ou de preenchimentos naturais.

Esta metodologia (simples e rápida) afigura-se adequada para o controle dos efeitos do escoamento da água através das fundações

das barragens.

### 2.2.3 - Variações de temperatura

i) As variações de temperatura com interesse para o funcionamento mecânico e hidráulico do maciço de fundação resultam essencialmente:

- da estabilização ou da atenuação da pulsação térmica do maciço após a instalação da albufeira e das trocas de calor ocasionais e localizadas entre a massa de água percolante e o maciço rochoso; esta estabilização, ou atenuação, far-se-á a níveis térmicos mais elevados ou mais baixos consoante a zona geográfica em que a obra se encontra;

- da eventual onda térmica anual experimentada pela massa líquida da albufeira e a sua repercussão na água infiltrada.

Determinações de temperatura efectuadas em fundações de barragens portuguesas durante o primeiro enchimento da albufeira, e posteriormente, levam a supor que as variações de temperatura, um ano após o início do enchimento, em zonas com drenâncias observadas inferiores a  $0,25 \text{ l. min.}^{-1} \text{ m.}^{-1}$  variam entre  $-2^{\circ}\text{C}$  na zona do contacto betão-rocha e  $-0,5^{\circ}\text{C}$  a 20 m de profundidade. Para zonas com drenâncias inferiores a  $0,05 \text{ l. min.}^{-1} \text{ m}^{-1}$  essas variações são inferiores a  $-1,5^{\circ}\text{C}$  na zona de contacto betão-rocha, decrescendo com a profundidade, passando a ser da ordem dos  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , ou inferiores, a 10 - 12 m de profundidade.

Se considerarmos durante a fase de primeiro enchimento um período mais curto, da ordem de um a dois meses, durante o qual se processam normalmente as subidas mais significativas do nível de água, senão o enchimento completo, constata-se que essas variações são muito pequenas e ocorrem, predominantemente, ao longo dos 10 m superiores da fundação.

Com o tempo, a transferência de calor maciço de fundação-água percolante leva a um progressivo arrefecimento daquele até atingir o equilíbrio de fluxo térmico.

Na Fig. 5 podem observar-se as curvas térmicas referentes à fundação de três barragens portuguesas. Em A trata-se de uma barragem abóbada fundada em formação xistosa e em B trata-se de duas barragens gravidade, uma fundada em formação xistosa e outra em

formação granítica, e, também, de uma barragem abóbada fundada em granito.

Os gráficos apresentados são elucidativos do que atrás se referiu.

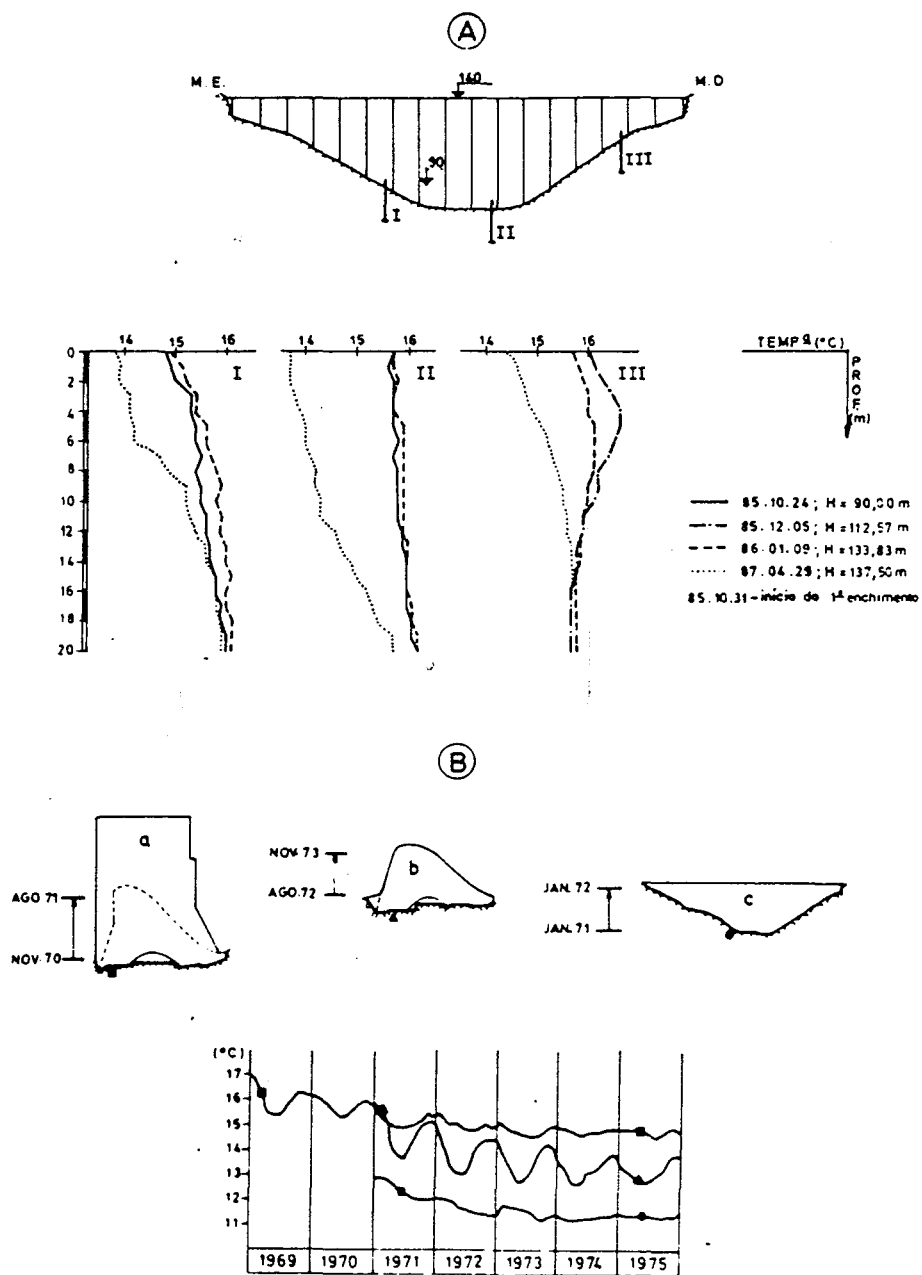


Fig. 5 - Variações de temperatura observadas em fundações.

No caso da barragem gravidade e da barragem abóbada fundadas

em granito (gráficos B), o período de observação ascende já a mais de 10 anos. As variações máximas de temperatura registadas no maciço após o início do primeiro enchimento da albufeira são da ordem de 2°C.

Por outro lado, a maior percentagem de variação térmica ocorre, geralmente, até dois anos após o início do primeiro enchimento.

ii) As variações de temperatura do maciço rochoso provocarão, de acordo com o seu coeficiente de dilatação volumétrico, eventuais deslocamentos (função do estado de compartimentação) e/ou variações do estado de tensão.

Em qualquer dos casos poderão registar-se, embora com baixa probabilidade, arranjos internos que eventualmente se venham a traduzir em ligeiros assentamentos (caso do abaixamento de temperatura) da base da estrutura e alteração da permeabilidade (sentido dependente do tipo, intensidade e orientação da fracturação).

Na Fig. 6 apresenta-se sob forma gráfica a variação de abertura de uma diaclase pertencente a uma família com espaçamento de um metro. A situação, embora teórica, pretende por em relevo a influência das variações de temperatura sobre a condutividade hidráulica de um maciço fracturado.

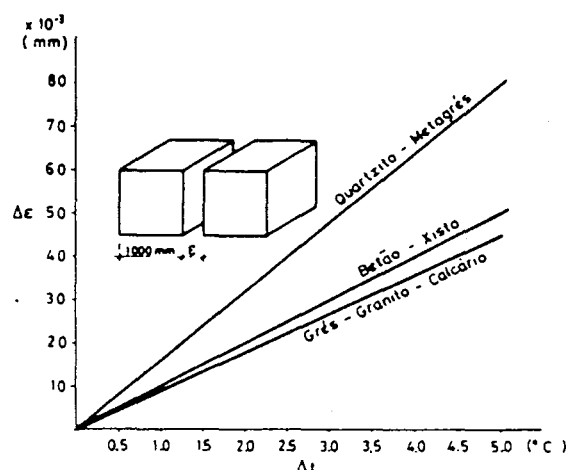


Fig. 6 - Influência das variações de temperatura na abertura de fracturas.

Consideremos, para melhor compreensão, as expressões que regulam a condutividade hidráulica de fracturas (Louis 1974):

- em regime laminar

$$K = K_1 \epsilon^2,$$

em que

$K$  = condutividade hidráulica

$\epsilon$  = abertura da fractura

$$K_1 = \frac{\tau \cdot g}{12 \cdot \nu \cdot c} \quad \text{onde}$$

$\tau$  = grau de continuidade da fractura

$g$  = aceleração da gravidade

$\nu$  = viscosidade cinemática da água

$c$  = constante dependente da rugosidade ( $\delta$ ) da fractura e do seu diâmetro hidráulico ( $D_h$ )

- em regime turbulento

$$K = K_t \sqrt{\epsilon}, \quad \text{em que } K_t = 4 \tau \sqrt{g} \cdot \log \frac{d}{\delta/D_h},$$

sendo  $d = 1,9$  para  $\delta/D_h > 0,033$ , o que acontece geralmente.

Pode-se, assim, perceber que, para determinadas características de fracturação do maciço, as variações de temperatura podem condicionar através dos parâmetros  $\epsilon$  e  $\nu$  as suas características hidráulicas.

iii) Na verdade, algumas propriedades físicas da água são também afectadas pelas variações de temperatura. Uma das mais importantes para o condicionamento das propriedades hidráulicas dos maciços é a viscosidade.

Na Fig. 7 apresenta-se a variação da viscosidade cinemática da água em função da temperatura.

Se tivermos em consideração a expressão acima referida sobre a condutividade hidráulica de uma fractura em regime laminar podemos concluir que: a condutividade hidráulica varia na razão directa da variação de temperatura da água; essa variação pode ser significativa em maciços onde, quer pelas condições climáticas quer pelo regime de exploração da albufeira, se registem variações acentuadas da temperatura da água infiltrada.

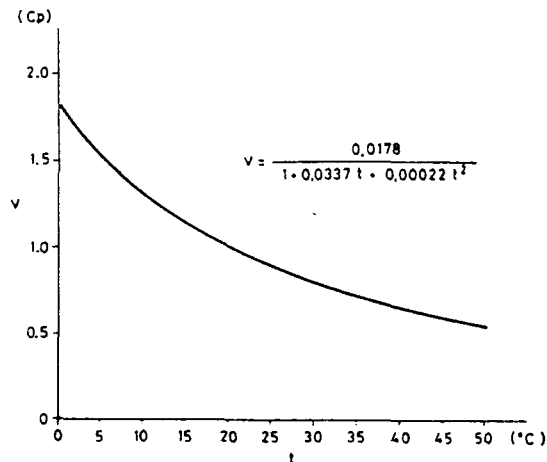


Fig. 7 - Influência da temperatura na viscosidade cinemática da água.

Há porém outros aspectos em que as variações de temperatura, quer da água quer dos materiais (maciço rochoso ou betão da barragem), assumem extraordinária importância. No domínio da alteração da constituição e propriedades dos materiais elas podem controlar de forma decisiva os fenómenos físicos e químicos.

No campo da deterioração físico-mecânica são sobretudo os ciclos de tensões térmicas, resultantes da conjugação das variações de temperatura com propriedades térmicas diferenciadas dos vários constituintes dos materiais, que conduzem à fadiga e ruína destes.

iv) No campo da alteração química protagonizada pela água, como é sabido, quer a velocidade das reacções quer o seu sentido são fortemente influenciadas pela temperatura do conjunto sólido-líquido (solvente).

Na dinâmica que se estabelece geralmente entre os dois principais agentes da reacção (sólido e líquido), tendente à manutenção do equilíbrio, um dos factores que influencia a velocidade de dissolução é a superfície de contacto do sólido com o líquido; outro desses factores é a temperatura, cuja influência é decisiva para o estabelecimento dos níveis de energia cinética dos átomos que lhes

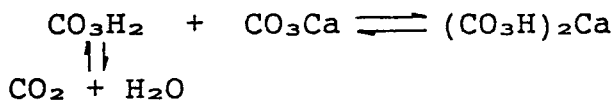
permitam ultrapassar a energia de activação e ocorra a reacção.

Esta natureza dinâmica do equilíbrio, em que a temperatura desempenha papel decisivo, regula assim o sentido em que se dá a reacção (dissolução ou precipitação).

Essa influência pode ser claramente apercebida com os exemplos que a seguir se mencionam.

O calcário ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ), por exemplo, dissolve-se sob a forma de bicarbonato de cálcio ( $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ ) sendo, desta forma, transportado em solução.

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) dissolvido na água é o principal responsável por este fenómeno:



A dinâmica deste equilíbrio é resultante da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Esta sofre, por sua vez, variações provocadas por três causas: pressão, temperatura e actividade vegetal.

A quantidade de  $\text{CO}_2$  dissolvido varia na razão inversa da temperatura: a  $0^\circ\text{C}$  a água dissolve 2,15 l de  $\text{CO}_2$ ; a  $15^\circ\text{C}$  dissolve 1,0 l de  $\text{CO}_2$ ; e a  $25^\circ\text{C}$  dissolve 0,8 l de  $\text{CO}_2$ .

Quer isto dizer que águas de temperaturas mais baixas se tornam mais agressivas para o carbonato de cálcio e, conseqüentemente, para os cimentos dos betões (Fig. 3).

Porém, a agressividade efectiva da água deve ter não só este aspecto em consideração mas também o facto, atrás referido, do aumento da velocidade de reacção com o aumento da temperatura.

O próprio índice de saturação de Langelier (ICOLD 1987), vulgarmente designado por índice de agressividade ( $i$ ), revela essa influência, embora reduzida, da temperatura da água:

$$i = \text{pH} + \log C + \log A + 0,025 T + 0,011 S - 12,3$$

onde

$i$  = índice de saturação (índice de agressividade)

$C$  = dureza carbonatada

$A$  = alcalinidade ( $\text{pH} < 8,3$ )

$T$  = temperatura ( $0 < T < 25^\circ\text{C}$ )

$S$  = total de sais dissolvidos ( $S < 1000 \text{ mg/l}$ )



Para um determinado tipo de água (determinado pH e composição) a sua agressividade varia numa relação directa com a temperatura.

#### 2.2.4 - Acções sísmicas

i) A acção sísmica, basicamente uma acção dinâmica transmitida às estruturas, é consequência, como o próprio nome indica, da ocorrência de sismos e depende de vários factores, entre os quais se destacam pela sua importância: o mecanismo de geração, as condições geológicas, estruturais e tectónicas da região atravessada pelos trens de ondas e do local da obra, a distancia ao foco sísmico e as condições topográficas do local e as características geométricas e estruturais da obra solicitada.

Um pouco por todo o lado tem-se verificado a ocorrência de sismos durante e após o primeiro enchimento de alguns reservatórios. Esta actividade sísmica tem-se manifestado, na maior parte dos casos, por sismos de fraca intensidade. Porém, casos tem havido em que a magnitude atinge valores da ordem de 6, de que são exemplos Kariba, Hsinfengkiang, Koyna, Kremasta e Oroville (Skipp e Higgins 1981).

Os casos registados têm ocorrido quer em zonas com comprovada actividade sísmica natural quer em zonas de baixa a nula actividade anterior. Acontece que, na primeira situação, as intensidades máximas registadas são geralmente inferiores à intensidade máxima observada para sismos naturais, enquanto que, na segunda, essas intensidades são muito mais elevadas, por vezes ultrapassando as registadas na primeira.

Na realidade, a maioria dos sismos induzidos (SI) pela instalação de reservatórios de barragens distribuem-se de forma praticamente aleatória no que diz respeito às condições geológicas. Têm ocorrido tanto em zonas de escudo (cratões) como em zonas intraplaca e marginais (associadas a vulcanismo e orogénese alpina). Estes três tipos de zonas apresentam condições de génese sismotectónica distintas, o que se traduz na constituição de províncias com graus de sismicidade diversos.

Seria, assim, de esperar que os SI nessas zonas revelassem características próprias, de acordo com aquele zonamento. Para além de poucos casos bem identificados, tal não se verifica.

Na Fig. 8 pode constatar-se que, de 53 casos de SI aí tratados

(Skipp e Higgins 1981; Guha et al 1981), cerca de 50% ocorreram em zonas onde anteriormente não se tinha registado sismicidade natural, ou a registada apresentava um nível baixo (magnitude Richter  $M < 3$ ). Dos restantes 50%, 40% ocorreram em zonas de sismicidade moderada ( $3 < M < 5,9$ ) e 10% em zonas de sismicidade elevada ( $M > 5,9$ ).

Por outro lado, em zonas de nula a baixa actividade sísmica, ocorreram a totalidade de SI com  $M < 3$ , 61% dos SI com  $3 < M < 4$ , 35% dos SI com  $4 < M < 5$ , 17% dos SI com  $5 < M < 6$  e 67% dos SI com  $M > 6$ .

Parece, assim, ser-se levado a admitir que as zonas de sismicidade moderada a alta são responsáveis pela ocorrência do maior número de SI com  $4 < M < 6$ , sendo as zonas de nula a baixa sismicidade responsáveis pela maioria dos SI com magnitude inferior e superior áqueles valores, respectivamente.

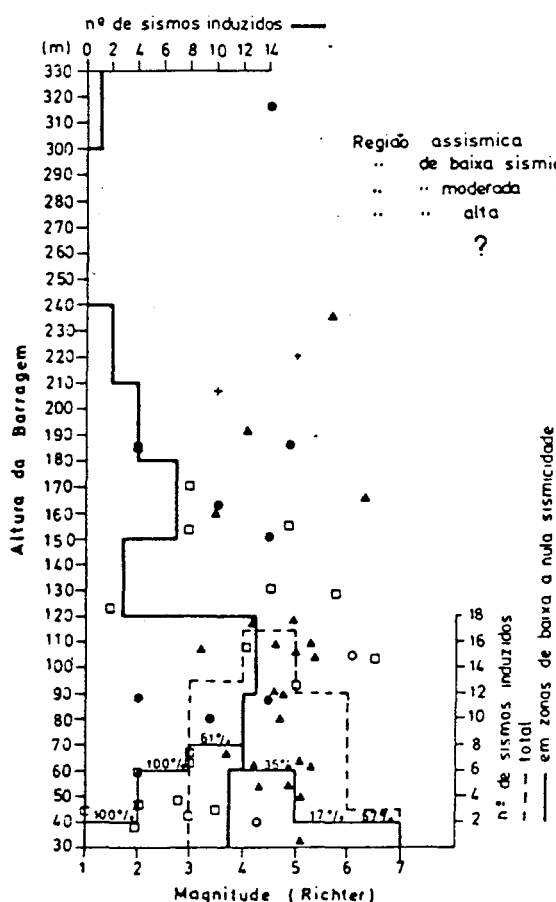


Fig.8 - Sismos induzidos pela instalação de albufeiras.

Quanto à magnitude dos SI, pode verificar-se que as maiores frequências de ocorrência se registam para  $3 < M < 6$ , com o valor mais elevado para  $4 < M < 5$ .

O número de ocorrências de SI verifica-se ser maior para barragens cuja altura se situa entre 40 e 120 m, com predominância para as de 90 a 120 m. Este facto poderá ser considerado normal, se tivermos em atenção que é naquele domínio de altura que se situa o maior número de barragens construídas que têm sido objecto de maiores cuidados de observação e de estudos de comportamento.

Se exceptuarmos os SI de Koyna, Kremasta e Hsinfenkiang, este último em zona de escudo (intraplaca), os sismos mais numerosos e de maior magnitude ocorreram em zonas de moderada a alta sismicidade natural, correspondentes, na maioria, a zonas com características de actividade sismotectónica reconhecidas.

Não entrando em linha de conta com as condições geológicas locais (litologia, estado de tensão, estrutura e tectónica), e admitindo que a instalação do reservatório não contribui significativamente para alterar o estado de tensão regional, somos levados a supor que a ocorrência de SI se fica a dever à infiltração e eventual percolação de água no maciço, ao longo de feições estruturais e tectónicas activas, fazendo baixar o nível de resistência ao deslizamento e levando, conseqüentemente, à libertação de tensões. Esse facto provocará a antecipação dos estados de rotura, certamente a níveis de energia mais baixos, em situações com maior ou menor multiplicidade de eventos, consoante as condições geotectónicas, litológicas e estruturais.

É neste enquadramento que se podem encontrar as relações de interdependência entre as condições geológicas e a sismicidade, quer "induzida" quer natural.

A ausência de estudos profundos das condições geológicas locais e regionais estão na origem do desconhecimento das suas reais características sismotectónicas, que permitam efectuar um microzonamento correcto quanto à aptidão para produzir sismos induzidos pelas acções resultantes da instalação de reservatórios ou outro tipo de exploração do meio (mineira, armazenamento subterrâneo, hidrogeológica, petrolífera, etc).

É-se, assim, conduzido a uma situação de difícil relacionamento entre as condições pré e pós-instalação dos reservatórios, e,

consequentemente, à correcta previsão do nível de sismicidade induzida.

Quer isto dizer que o factor de correlação entre as condições geológicas e a sismicidade variará na razão directa do conhecimento daquelas e dos mecanismos de geração desta.

ii) Estes factos têm levado à realização de estudos de macro e de microzonamento sísmico interessando, respectivamente, a zona e a região onde se localizam os reservatórios. Estes estudos têm por finalidade a definição das características da sismicidade potencial e das solicitações sísmicas a considerar no dimensionamento e segurança das estruturas (Oliveira, 1976; LNEC, 1977).

No caso das barragens, a utilização de redes de observação da sismicidade induzida tem permitido, por um lado, aprofundar essa caracterização e, por outro, a análise comparada de parâmetros sísmicos associados à actividade pré e pós enchimento dos reservatórios. De facto, tem-se verificado em alguns casos, como por exemplo, Kariba, Idukki, Mula, Kremasta, Manicouagan e Koyna, alteração dos valores de  $b$ , da expressão  $\text{Log } N = a - bM$  (Richter 1958), relativamente às séries de sismos ocorridos antes e após os sismos induzidos de maior magnitude (Guha et al 1981). Em geral, o valor de  $b$  associado a séries de sismos induzidos é mais elevado do que o valor de  $b$  associado às séries de sismos naturais ocorridos na região.

Estes aspectos, de primordial importância para a previsão da ocorrência de sismos induzidos de elevada magnitude, e a consequente definição e prevenção de riscos, justificam os estudos de microzonamento efectuados e a instalação de redes de observação sísmica desde bastante cedo em relação ao primeiro enchimento e durante um período, depois deste, que será definido em função da actividade registada.

iii) A forma como se comportam as barragens solicitadas por acções dinâmicas fortes (sismos naturais ou induzidos) leva a admitir que se trata de estruturas que, na generalidade, resistem de forma satisfatória a este tipo de eventos.

Na realidade, umas resistem melhor que outras, dependendo de vários factores, designadamente o tipo de estrutura, as características geométricas e construtivas e os materiais empregues.

No quadro 3 indica-se o número de barragens atingidas por sismos (magnitude Richter  $M > 5$ ) (Serafim e Oliveira 1987).

Quadro 3 - Barragens afectadas por sismos (adaptado de Serafim e Oliveira 1987).

Tipo	Total de barragens "World Register of Dams" (1984)	Nº de barragens atingidas por sismos		
		Total	com consequências	Rotura
Gravidade	3953	26	8	0
Arco	1527	41	7	0
Arcos múltiplos	136	3	1	0
Contrafortes	337	6	3	0
Terra	27255	89	48	3
Enrocamento	1590	15	8	0
Total	34798	180	75	3

Como se pode verificar, as barragens de betão revelam, pelos números apresentados, maior capacidade de resistência, sem danos graves, aos choques sísmicos. De facto, de um total de 76 barragens atingidas por sismos ( $M > 5$ ) 19 sofreram consequências (25%), não se tendo registado nenhum caso de rotura. São contudo as barragens tipo arco que evidenciam as melhores performances neste domínio.

Relativamente às barragens de aterro, dos 104 casos registados em que se fez sentir a acção sísmica ( $M > 5$ ), 56 sofreram danos (54%) entre os quais se contam 3 casos de rotura das estruturas (barragens de terra). São as barragens de terra que evidenciam a maior susceptibilidade a acções dinâmicas desta natureza.

#### 2.2.5 - Outras acções

##### 2.2.5.1 - De natureza tectónica

As forças de natureza tectónica são agentes activos do estado de tensão crustal e, conseqüentemente, podem contribuir também para o estado de tensão local que influencia o maciço de fundação da barragem. Isto, apesar da fundação se situar em zonas rochosas superficiais, por vezes de cota elevada, e portanto sujeitas já aos processos destrutivos da geodinâmica externa. Ganham particular interesse neste domínio zonas com processos de geodinâmica interna activos à luz da tectónica global.

A avaliação destas forças faz-se, normalmente, recorrendo a métodos geológicos (métodos estratigráficos, geomorfológicos e sismológicos), embora localmente se possa recorrer a determinados instrumentos de observação e ensaio para identificação do estado de tensão, designadamente métodos mecânicos e geofísicos (Rocha 1981; Rodrigues 1982).

As taxas de variação dos campos de tensões são naturalmente muito baixas, sendo difícil a sua quantificação para escalas temporais tão reduzidas como são as de vida útil das obras. Interessa sobretudo, neste domínio, definir o campo de tensões e o seu relacionamento com estruturas tectónicas locais ou regionais activas, ou passíveis de reactivação com a instalação do reservatório, e com o seu potencial sísmico natural e o previsionalmente induzido, e, ainda, consoante o tipo de obra a realizar, caracterizar o estado de tensão inicial no local.

#### 2.2.5.2 - Induzidas por outras obras

A realização de obras vizinhas, de que se destaca a abertura de galerias ou poços, a escavação ou sustimento de taludes e a sua posterior utilização, podem também induzir esforços na fundação das barragens provocados pela alteração do estado de tensão e/ou de deformação do maciço ou das suas condições hidrogeológicas.

Para a sua observação (obras subterrâneas e taludes), podem ser utilizados equipamentos de medida do tipo dos enunciados para a observação dos esforços induzidos, de que se destacam os convergenciómetros, os extensómetros de varas ou de fios, os tubos piezométricos, as ancoragens instrumentadas e também métodos geodésicos.

#### 2.2.5.3 - Descarregamentos

As acções resultantes do impacto da água descarregada directamente na fundação a jusante ou do turbilhonamento provocado nas bacias de amortecimento são predominantemente físico-mecânicas.

O elevado hidrodinamismo associado aos descarregamentos provoca, assim, intenso desgaste inicial nos maciços rochosos o qual se vai atenuando à medida que se vão aumentando as condições de amortecimento criadas pelo progressivo espessamento da camada líquida de recepção.

A quantificação dessas acções para uma dada obra é feita, normalmente, através do caudal evacuado e/ou turbinado e, por vezes, também através da medição das condições hidrodinâmicas reais com equipamento colocado nas bacias. Os consequentes efeitos erosivos são geralmente avaliados por levantamento periódico da geometria da bacia, inspecções visuais e quantificação volumétrica das barras criadas.

### 2.3 - Sistemas de observação do comportamento hidromecânico das fundações

#### 2.3.1 - Sentido evolutivo

Tendo em atenção os aspectos fundamentais da observação da fundação das barragens de betão discriminados nas alíneas anteriores tecem-se, em seguida, algumas considerações sobre os Planos de Observação, em particular no que respeita àquela importante parte das obras.

Foram referidas nas alíneas anteriores as mais importantes acções e efeitos relacionados com o funcionamento quer hidráulico quer mecânico dos maciços rochosos de fundação.

Na primeira metade deste século, os conhecimentos e conceitos subjacentes à elaboração dos projectos e construção das obras não constituíam motivação para a observação de boa parte daquelas acções e efeitos, em particular no que diz respeito à fundação.

A experiência portuguesa mostra que, desde finais da década de 40, quando foi incrementada a construção de barragens de betão, os planos de observação das obras, para os quais contribuiu a intervenção do LNEC, na altura recém criado, reflectia já a preocupação de observar o comportamento mecânico da fundação.

Essa preocupação aumentou na década de 60 devido à ocorrência de incidentes e de acidentes em algumas barragens estrangeiras, de que se destacam os casos de Malpasset e Vajont.

Subjacente, porém, ao propósito de observar existe a necessidade de estudar convenientemente nas fases de projecto e de construção os maciços rochosos dos pontos de vista geológico e geotécnico (hidráulico e mecânico).

Neste domínio é importante também a experiência portuguesa, designadamente do LNEC, na caracterização dos maciços rochosos (Rocha 1981; Rodrigues et al 1983; Oliveira 1983).

Os planos de observação são o instrumento base de toda a observação de uma obra. Segundo o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) (CSOPT 1987), plano de observação é um "documento de carácter vinculativo, base do controle de segurança estrutural. O plano conterá aspectos técnicos resultantes da evolução e pormenorização do antepiano de observação, e aspectos organizativos, definindo os elementos essenciais à execução do controle".

Nele se consagra o conjunto de variáveis a observar que servirão ao controlo da segurança da obra, à verificação das hipóteses de projecto e ao aprofundamento dos conhecimentos científicos e tecnológicos sobre os materiais, as estruturas e os equipamentos. Aí se define, ainda, e sobretudo, o correspondente sistema de observação e o conjunto de regras e normas que norteiam a colocação dos equipamentos, a sua exploração futura e, de um modo genérico, a análise e interpretação dos resultados da observação e o subsequente controlo de segurança da obra.

Como se disse, desde finais da década de 40 que o LNEC intervem directamente na elaboração dos planos de observação das obras (Pedro 1987).

Esses planos reflectem, obviamente, as preocupações dominantes do projectista, dono de obra e administração pública, esta responsável pela segurança de pessoas e bens.

Os planos de observação, influenciados pela dinâmica dos conhecimentos e conceitos subjacentes a essas preocupações, têm sofrido evolução desde então.

Essa evolução é mais pronunciada no que respeita à observação das fundações, em particular à observação das acções da água e correspondentes efeitos.



De facto, em relação às superestruturas, o conhecimento dos materiais e do funcionamento estrutural, mais facilmente modeláveis, primeiro fisicamente e depois matematicamente, permitiu uma rápida aproximação à definição exacta dos diversos cenários de comportamento. Daí que a evolução dos critérios de definição dos planos de observação e correspondentes sistemas de observação da superestrutura não tenha sofrido grandes alterações. A evolução processa-se sobretudo ao nível da inovação tecnológica dos equipamentos, melhorando as suas performances e capacidades de automação e no estudo dos materiais "in situ" (betão).

Por outro lado, a observação da fundação tem sofrido evolução ao nível da filosofia (critérios e conceitos) e dos sistemas de observação, em particular no que respeita ao controlo da eficiência dos sistemas de impermeabilização-drenagem e do comportamento mecânico das fundações.

Merece ainda destaque a importância de que se tem revestido a inclusão da rede de drenagem das fundações nos sistemas de observação. Na verdade, a sua criação não tem como finalidade a observação da fundação mas, com base em critérios de dimensionamento, fazer o alívio das subpressões, eventualmente geradas, para níveis aceitáveis.

Porém, a sua exploração como sistema de observação tem-se revelado de extraordinária importância, quer na avaliação das situações de comportamento hidráulico quer como base de estudo da deterioração dos materiais.

Referem-se em seguida, a título ilustrativo no que respeita à fundação, e resumidamente, os sistemas de observação de cinco barragens de betão, cujos planos de observação reflectem a preocupação de observar o comportamento da fundação, mas onde é visível a evolução dos conceitos e dos equipamentos (Fig.9).

#### - Barragem de Venda Nova

Esta barragem, tipo arco-gravidade, foi construída no rio Rabagão em 1951. O seu plano de observação data de 1949 (LNEC 1949).

O esquema de tratamento da fundação não previa a instalação de qualquer rede de drenagem. Esta veio a ser criada em 1964 devido à existência de resurgências a jusante e à suspeita de elevados níveis de subpressão na fundação. É desta altura também a instalação

dos primeiros piezómetros na fundação, reflectindo já a preocupação de observar o gradiente de subpressões na fundação ao longo de algumas secções características segundo a direcção montante-jusante.

A rede de drenagem foi posteriormente reforçada em 1979.

O sistema de observação inicial incluía já a instalação de extensómetros acústicos com 25 cm de base na rocha de fundação, na base da barragem, para medição das deformações sofridas pelo maciço.

Em 1985, na sequência de obras de reparação da fundação, o sistema de drenagem e o de observação da fundação foram reforçados com mais drenos, piezómetros e extensómetros de fundação de varas (EDP 1984; Silva e Bravo 1987).

#### - Barragem de Carrapatelo

Trata-se de uma barragem descarregadora em perfil gravidade aligeirada cuja construção terminou em 1970 no curso nacional do rio Douro.

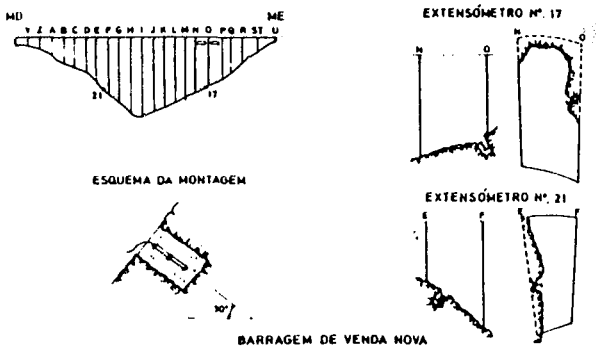
O sistema de observação da fundação incluído no plano de observação (LNEC 1966) previa a instalação de grupos de extensómetros de grande base (200cm de base) e de pêndulos invertidos e bases de alongâmetro para observação da deformação do maciço de fundação na base da barragem, e de piezómetros para observação das subpressões na fundação.

Verifica-se aqui uma evolução significativa ao nível da filosofia e dos equipamentos. Em primeiro lugar, o plano de observação reflecte a preocupação da observação das componentes mecânica e hidráulica da fundação, e, em segundo lugar, a preocupação de adequar equipamentos à observação desses dois domínios.

Na realidade, os extensómetros com 25cm de base não se revelaram adequados à observação de maciços com descontinuidades com espaçamentos variáveis, os quais, na generalidade, ultrapassavam largamente aquela medida. Por outro lado, a existência de descontinuidades incluídas no campo de medida do aparelho causava perturbação ao seu correcto funcionamento. Os extensómetros com 200cm de base era já uma forma de resposta a essa questão.

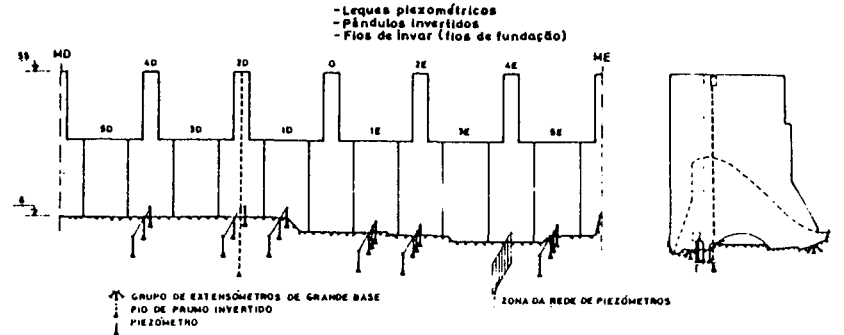
A instalação de piezómetros em perfis montante-jusante, tal como já acontecera na barragem do Alto Rabagão, reflectia a neces-

**DÉCADA DE 40-50**  
- Extensômetros na rocha de fundação



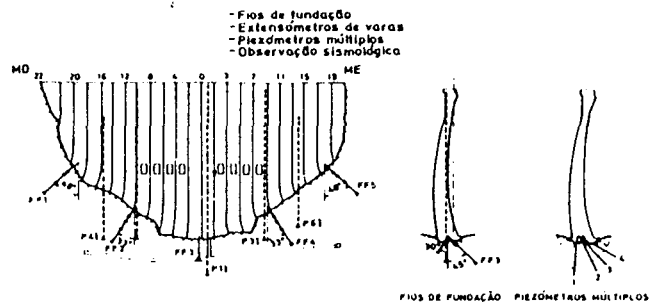
BARRAGEM DE VENDA NOVA

**DÉCADA DE 60**



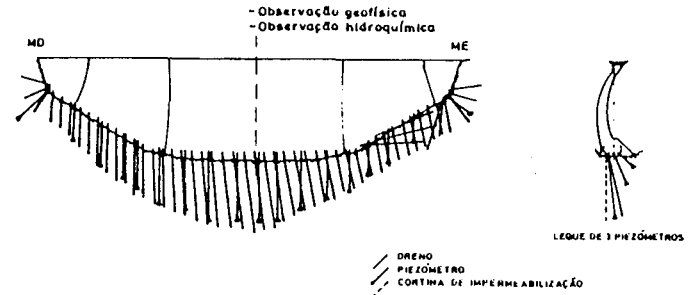
BARRAGEM DO CARRAPATELO

**DÉCADA DE 70**



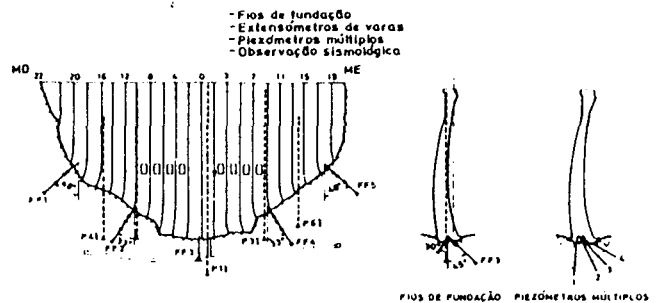
BARRAGEM DE CAHORA-BASSA

**DÉCADA DE 80**



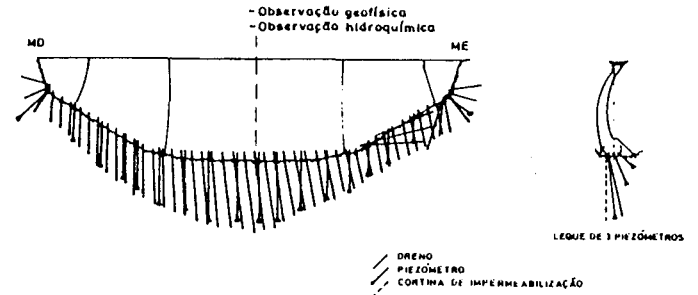
BARRAGEM DO FUNCHO

**DÉCADA DE 70**



BARRAGEM DO VAROSA

**DÉCADA DE 80**



BARRAGEM DO FUNCHO

Fig. 9 - Aspectos mais relevantes da evolução dos sistemas de observação da fundação.

fundação desde montante.

#### - Barragem de Cahora-Bassa

A barragem de Cahora-Bassa, uma estrutura em abóbada de dupla curvatura, foi construída no rio Zambeze, em Moçambique, no início da década de 70.

Para além da instalação de pêndulos invertidos para medição dos deslocamentos horizontais na base da barragem, o plano de observação (LNEC 1972; LNEC 1979) previa a instalação de fios de fundação com diversos comprimentos até 40m de profundidade, para observação detalhada dos deslocamentos internos do maciço de fundação, e leques de piezómetros múltiplos para observação das subpressões a várias profundidades da fundação segundo perfis montante-jusante. A associação destes dois tipos de dispositivos tinha como objectivo realizar a observação integrada do comportamento hidromecânico da fundação.

Trata-se, como é evidente, de importantes inovações que a evolução dos conhecimentos impunha (Mascarenhas 1979).

Na realidade, os extensómetros de grande base (200cm) não se revelavam, apesar desse comprimento, instrumentos adequados à observação aprofundada de maciços compartimentados. Outro tanto era sentido em relação às subpressões, cujos instrumentos de medida (piezómetros de furo total) só permitiam a medição de valores médios da subpressão nos furos.

No entanto, os fios de fundação e os sistemas de medição disponíveis não se revelaram possuidores da eficiência desejada para o objectivo proposto. Fenómenos de fluência e atrito dos fios ao longo das paredes dos furos estão na origem do seu mau funcionamento.

#### - Barragem do Varosa

Esta barragem, tipo abóbada de dupla curvatura, foi construída no rio Varosa, próximo da Régua, em 1976.

A principal inovação do sistema de observação (LNEC 1974) refere-se à instalação pela primeira vez na fundação de uma barragem portuguesa de extensómetros de fundação de varas. Estes foram colocados segundo três perfis radiais, possibilitando a medição de deslocamentos da fundação a três profundidades (8, 15 e 30m). Culminava, assim, com êxito a expectativa há longos anos acalentada de

observar com elevada exactidão os deslocamentos da fundação desde a base da barragem até profundidades teoricamente não influenciadas pelas variações do estado de tensão induzidas pela instalação e funcionamento da superestrutura.

Concomitantemente, foram instalados leques piezométricos em secções montante-jusante, algumas das quais concordantes com as dos extensómetros de fundação, permitindo, assim, a observação integrada do comportamento hidromecânico.

#### - Barragem do Funcho

A barragem do Funcho, uma abóbada delgada de dupla curvatura, está em fase de construção no rio Arade, próximo de Silves.

O plano de observação da obra (LNEC 1986a; LNEC 1988), tal como já acontecera em obras recentes -Torrão (LNEC 1984a) e Alto Lindoso (LNEC 1986) -, define os sistemas de observação, de que se destaca para a fundação: i) medição de deslocamentos na base da barragem e no maciço de fundação (verticais e horizontais) em secções radiais através de extensómetros de fundação, pêndulos invertidos, nivelamentos de precisão e bases de alongâmetro; ii) medição de subpressões na fundação ao longo de secções, também radiais, e da galeria de drenagem; iii) medição das características da água infiltrada e dos efeitos resultantes da percolação; e, iv) estudo da evolução das características geotécnicas globais do maciço (hidráulicas e, sobretudo, mecânicas) através do emprego de métodos geofísicos (método sísmico directo).

Está igualmente contemplado no plano de observação o propósito de observar o maciço envolvente da obra e as margens do reservatório, apontando-se os critérios básicos que devem presidir a tal observação.

#### 2.3.2 - Perspectivas de desenvolvimento

No domínio da observação das fundações assiste-se, presentemente, a uma motivação muito forte de projectistas e donos de obra para instrumentar convenientemente os maciços de fundação.

Por outro lado, o desenvolvimento tecnológico tem posto à disposição dos cientistas e técnicos equipamentos cada vês mais adequados e sofisticados.

Julga-se, portanto, que é possível e desejável que na observação das barragens portuguesas se possa dispor futuramente também de equipamentos adequados a determinados objectivos, ainda não totalmente alcançados, nomeadamente: i) para medição dos níveis de subpressão em pontos discretos do interior do maciço, o que pode ser alcançado através de piezómetros múltiplos fixos ou de sondas piezométricas móveis; ii) para medição dos deslocamentos no interior do maciço segundo as direcções mais convenientes ao estudo do comportamento mecânico, o que pode ser obtido através da utilização de extensómetros múltiplos de varas ou de integradores mecânicos ou electromecânicos de deslocamentos (tipo sliding-micrometer); e, iii) observação das características litológicas (incluindo o seu estado de alteração), estruturais (em particular da fracturação e sua eventual progressão) e da qualidade da água percolada através da utilização, por exemplo, de sondas para determinação das características fisico-químicas da água (já em utilização entre nós de forma pioneira em barragens) e de câmaras de TV.

No mercado encontra-se já hoje disponível uma gama variada de equipamentos que podem ser utilizados com estas finalidades. Trata-se de equipamentos geralmente de elevado custo; porém, dada a sua mobilidade e facilidade de operação, podem ser utilizados num conjunto numeroso de obras, o que se traduz, obviamente, num baixo custo por obra.

Por outro lado, no LNEC tem-se procurado desenvolver, também, equipamentos destinados sobretudo à observação do comportamento hidráulico, designadamente um obturador hidropneumático (Oliveira 1983), que permite a medição das pressões reais no troço de furo isolado para ensaio, e o piezómetro múltiplo (Mascarenhas 1979), que permite a medição individualizada de subpressões, e eventualmente caudais, em troços independentes de furos piezométricos instalados na fundação.

PARTE II

"APLICAÇÃO À BARRAGEM DE CAHORA-BASSA"

CAP 3 - A ESTRUTURA E O MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM  
DE CAHORA-BASSA

CAP 4 - COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO OBSERVADO

CAP 5 - ESTUDO HIDROGEOQUIMICO

CAP 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS





### 3 - A ESTRUTURA E O MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE CAHORA-BASSA

#### 3.1 - Características gerais do empreendimento

##### 3.1.1 - Barragem e reservatório

A barragem de Cahora-Bassa situa-se no troço médio inferior do rio Zambeze, na provincia de Tete em Moçambique.

E uma estrutura do tipo abóbada delgada de dupla curvatura, simétrica, com curvatura pouco acentuada na vertical e definida em planta por arcos parabólicos (Fig.10).

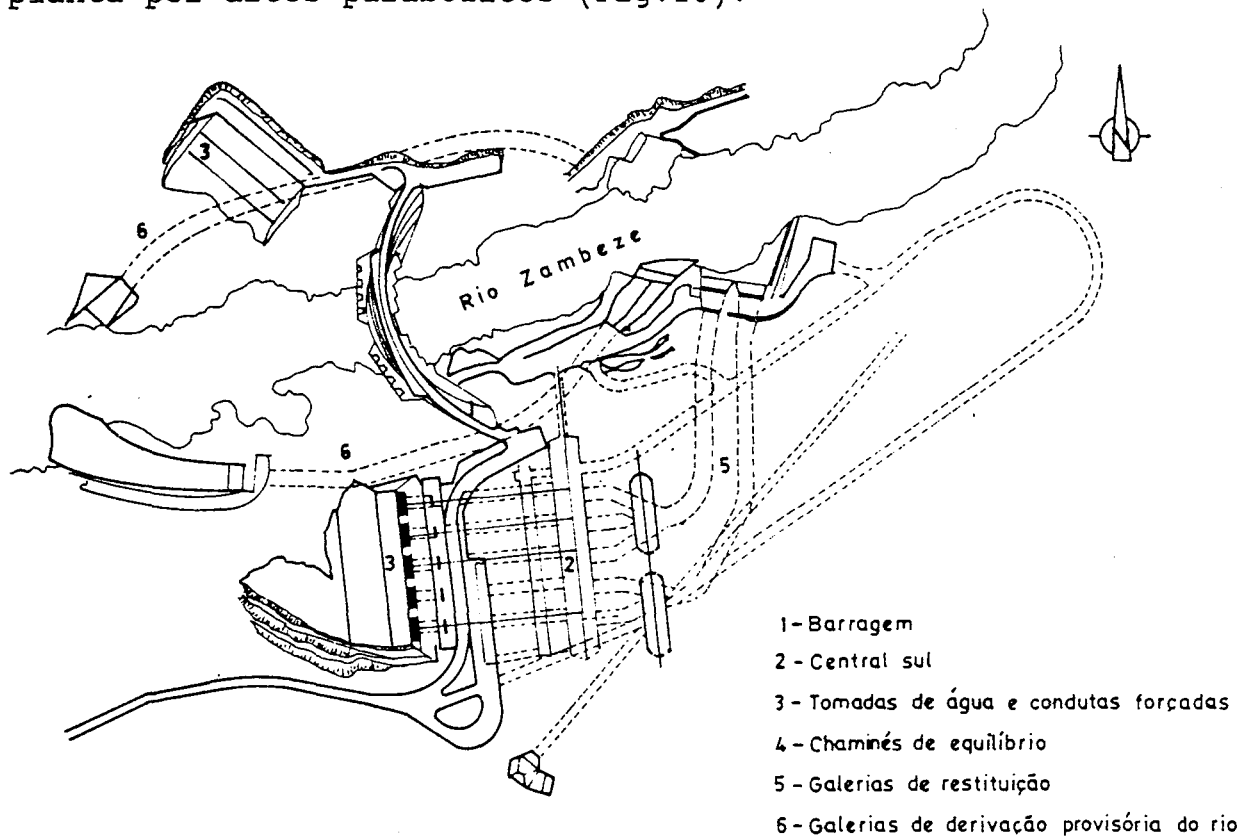


Fig. 10 - Planta do aproveitamento de Cahora-Bassa.

As suas características geométricas principais são as seguintes:

- altura máxima acima da fundação ..... 170 m
- desenvolvimento no coroamento ..... 300 m
- relação corda - altura ..... 1,54
- abertura em planta do arco do coroamento ..... 105°

- espessura da consola central no coroamento ..... 4 m
- espessura da consola central na base ..... 23 m

O reservatório criado tem uma capacidade de armazenamento de  $63 \times 10^9 \text{ m}^3$  e é alimentado pela precipitação na bacia hidrográfica com uma área de  $0,9 \times 10^6 \text{ km}^2$  que lhe está associada e pelas descargas da barragem de Kariba, a montante.

A correspondente albufeira cobre uma área com  $2700 \text{ km}^2$ , atingindo 250 km de extensão e 38 km de largura máxima.

São, assim, escoados pela barragem de Cahora-Bassa os caudais acumulados e correspondentes à bacia hidrográfica do Zambeze, a montante, cuja área é de  $0,9 \times 10^9 \text{ km}^2$  aproximadamente.

### 3.1.2 - Sistemas de observação utilizados

No presente estudo faz-se a análise das seguintes grandezas obtidas através da exploração dos equipamentos de observação que se indicam:

- deslocamentos horizontais, radiais e tangenciais da base da barragem, medidos em bases de fios de prumo invertidos;
- deslocamentos verticais relativos entre blocos, medidos em bases de alongâmetro colocadas em juntas de contracção, nas galerias da zona inferior da barragem;
- caudais drenados pela rede de drenagem da barragem;
- subpressões medidas em piezómetros da rede piezométrica e em drenos instrumentados para o efeito;
- concentrações iónicas e grandezas físico-químicas da água da albufeira e de águas drenadas, obtidas por intermédio de análises químicas laboratoriais.

Nas Figs. 11, 12 e 13 indicam-se os tipos de aparelhos utilizados na análise do comportamento hidromecânico feita neste relatório e as suas localizações.

São, para o efeito, analisados os deslocamentos horizontais e verticais obtidos com aparelhagem colocada na barragem próximo da fundação, designadamente bases de fio de prumo e bases de alongâmetro, e os caudais e subpressões medidos em drenos e piezómetros instalados no maciço de fundação. Foram, ainda, utilizados, como meio complementar de análise, dados de natureza hidro-geoquímica,

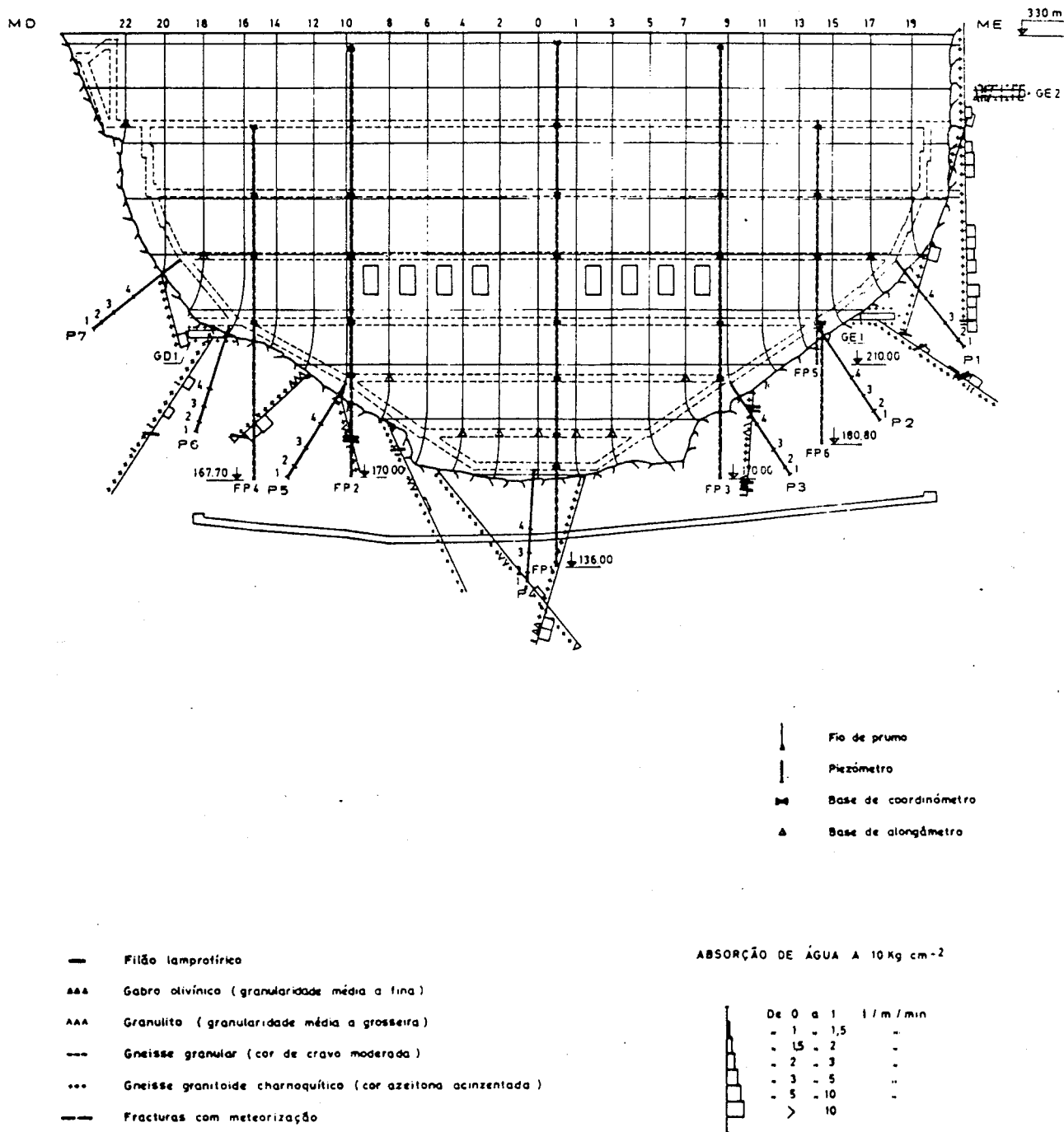


Fig. 11 - Localização dos sistemas de observação de deslocamentos e de subpressões na fundação e dos dados de reconhecimento geotécnico.

cuja recolha de águas e trabalho laboratorial de análise foi realizada pelo laboratório de análises da Hidroeléctrica de Cahora-Bassa no Songo.

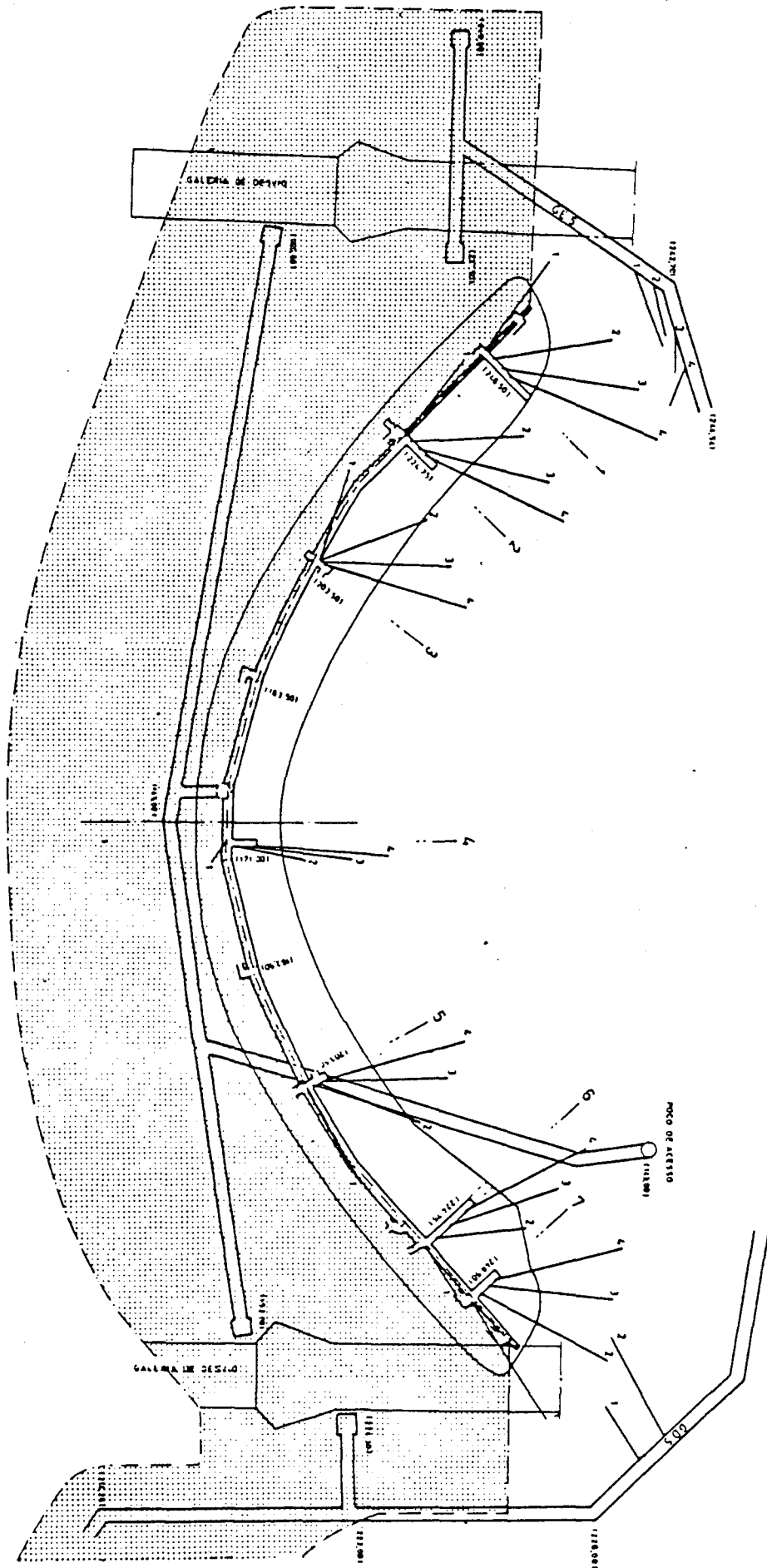


Fig. 12 - Localização dos leques piezométricos e definição em planta da zona de tratamento da fundação.

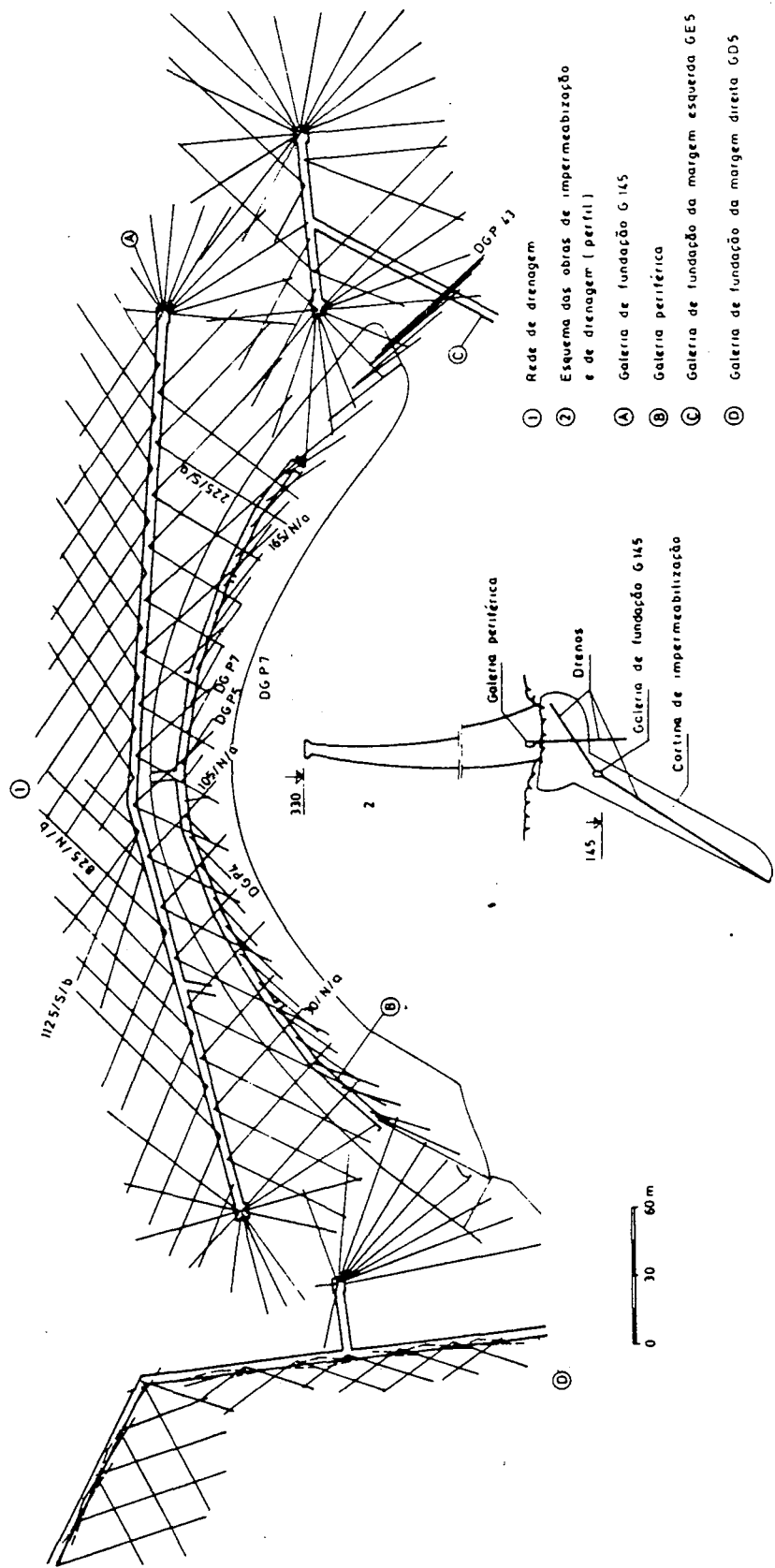


Fig. 13 - Localização da rede de drenagem e definição em alçado da zona de tratamento da fundação.

Não foram utilizados neste estudo os dados fornecidos pelos fios de fundação por não serem fiáveis; não se pode dispor, por esse motivo, de informação sobre os eventuais deslocamentos processados no interior do maciço de fundação.

A recolha de dados de natureza hidroquímica iniciou-se na albufeira desta barragem, com carácter sistemático, em 1977; em relação à água drenada, as análises tiveram início também nesse ano, mas a sua sequência foi posteriormente interrompida, tendo sido de novo reatada em 1985.

As colheitas de água da albufeira são feitas a cerca de 100 metros do paredão da barragem e a meio metro de profundidade. Em Novembro de 1985 fizeram-se colheitas até 50 m de profundidade. As águas dos drenos são colhidas à saída destes, com os cuidados necessários para evitar as trocas gasosas com o ambiente.

O período analisado corresponde à fase de exploração após o término do primeiro enchimento até final de 1985. Algumas grandezas, designadamente caudais e subpressões, foram analisadas desde 1975, após ter-se completado a primeira fase do enchimento.

Contribuiu, ainda, para o presente estudo a análise dos resultados da inspecção efectuada em Novembro de 1985 aos sistemas de observação do comportamento hidráulico da fundação.

### 3.2 - Aspectos geológicos

#### 3.2.1 - Caracterização regional

i) O rio Zambeze, desde a nascente, na região do Cazombo em Angola, até ao local da barragem de Cahora-Bassa, atravessa na sua maior extensão formações predominantemente de origem sedimentar continental pertencentes aos sistemas do Karroo e do Kalahari e, também, em extensões mais reduzidas, formações cristalinas antigas, geralmente atribuídas ao Precambriaco, postas a descoberto pela erosão (Fig. 14).

As formações do Karroo constituem espessa sequência que, da base para o topo, apresentam tilitos, arenitos e conglomerados (série Dwyka), carvão e lutitos (série Ecca), arenitos grosseiros e argilosos (série Beaufort) e, finalmente, arcoses grosseiros e lutitos encimados por extensas e potentes escoadas basálticas (Série Stormberg).

Durante o Jurássico e o Cretácico, fenómenos tectónicos de natureza distensiva originaram a formação de sistemas de falhas normais de direcção N-S, com marcadas características de "rifting", e a instalação de uma vasta gama de filões (dioríticos, gabróicos, doleríticos e lamprofiricos) que intruíram as formações mais antigas e as séries do Karroo. Este tipo de estruturas controlaram, posteriormente, alguns troços do curso do Zambeze.

O rio Zambeze, que desde a fronteira até ao início do canhão de Cahora-Bassa (foz do rio Nhacanzira) apresenta um percurso rectilíneo, corre junto ao contacto entre as formações sedimentares do Karroo e posteriores (a Sul) e as formações cristalofílicas do soco antigo (a Norte). O seu vale é condicionado pelo contraste litológico entre as duas formações e pela natureza tectónica do seu contacto.

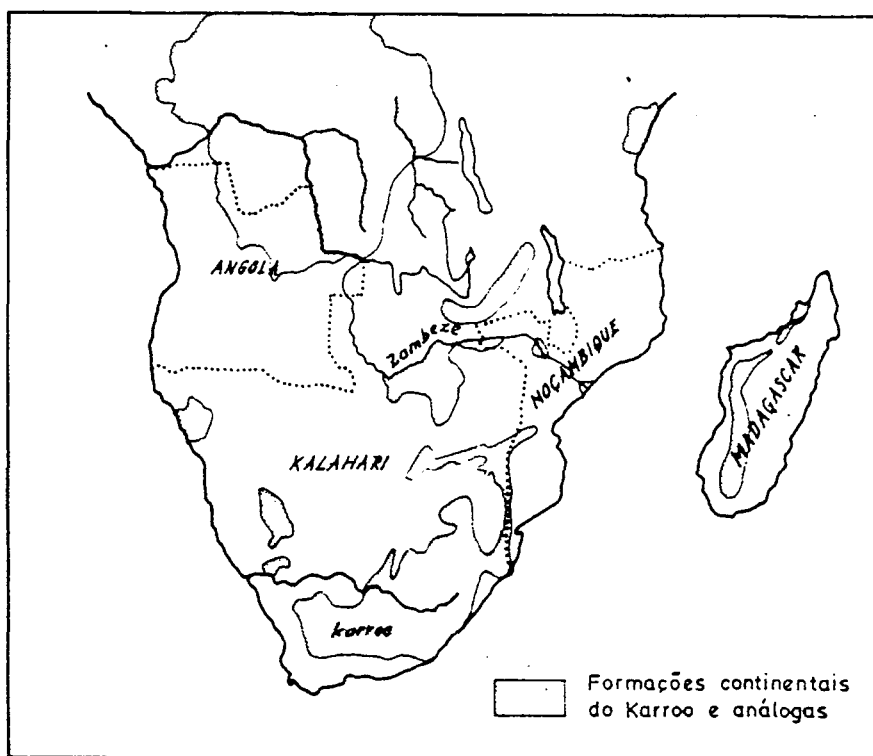


Fig. 14 - Enquadramento geológico da bacia do rio Zambeze (adaptado de Gignoux 1960).

O sistema do Kalahari inclui quartzitos, grés e calcários silicificados (andar dos grés polimorfos), e, ainda, cascalhos, laterites aluvionares e areias de plateau (andar das areias ocráceas).

As formações antigas précambricas são constituídas por uma variedade assinalável de rochas cristalinas e cristalofílicas que vão desde os granitos, sienitos e dioritos às séries metamórficas representadas por xistos, quartzitos, arcoses e gneisses (para e orto).

A região atravessada possui um coberto vegetal constituído por bosque e savana xerófila e climatéricamente apresenta estiagem húmida, periódicamente seca. Por esse motivo, o fornecimento, transporte e acumulação de matéria orgânica na rede de drenagem reveste-se de características cíclicas. A vegetação é mais exuberante na época quente e húmida (verão) e decai no restante período do ano.

ii) Cahora-Bassa situa-se na região sul-oriental de África.

O principal sistema sismo-tectónico que atravessa o continente africano (rifts da África Oriental) tem influenciado a evolução geológica daquela parte do continente. Trata-se do maior sistema de rifts continentais, ao qual estão associados geneticamente um conjunto numeroso de lagos naturais, vulcanismo ultra-alcalino (nefelinitos, ijolitos e carbonatitos) e fluxos térmicos de média a alta-entalpia (fumarolas, sulfataras e nascentes termais).

Este sistema de rifts continentais, com uma extensão de aproximadamente 6500 Km, desenvolve-se segundo um alinhamento N-S entre a fronteira da Síria com a Turquia até ao curso médio-inferior do rio Zambeze, atravessando as zonas tectonicamente estáveis do cratão africano (Fig. 15).

A Norte do lago Niassa divide-se em dois ramos, o oriental e o ocidental, constituindo um conjunto de grabens onde se instalaram numerosos lagos.

Cahora-Bassa localiza-se a sul do lago Niassa numa região que sofre já a influência do sistema tectónico resultante da reunificação dos dois ramos.

Os aspectos geomorfológicos e estruturais relacionam-se com o estilo tectónico que tem estado na origem e desenvolvimento destes grabens. A geração de falhas alinhadas com o eixo do rift, provo-



cada por tectónica distensiva, motiva o adelgaçamento da crusta, originando depressões, fluxos anormais de calor e vulcanismo alcalino. Geralmente, com direcção normal a esta, originam-se falhas de desligamento em que predomina a componente horizontal do movimento.

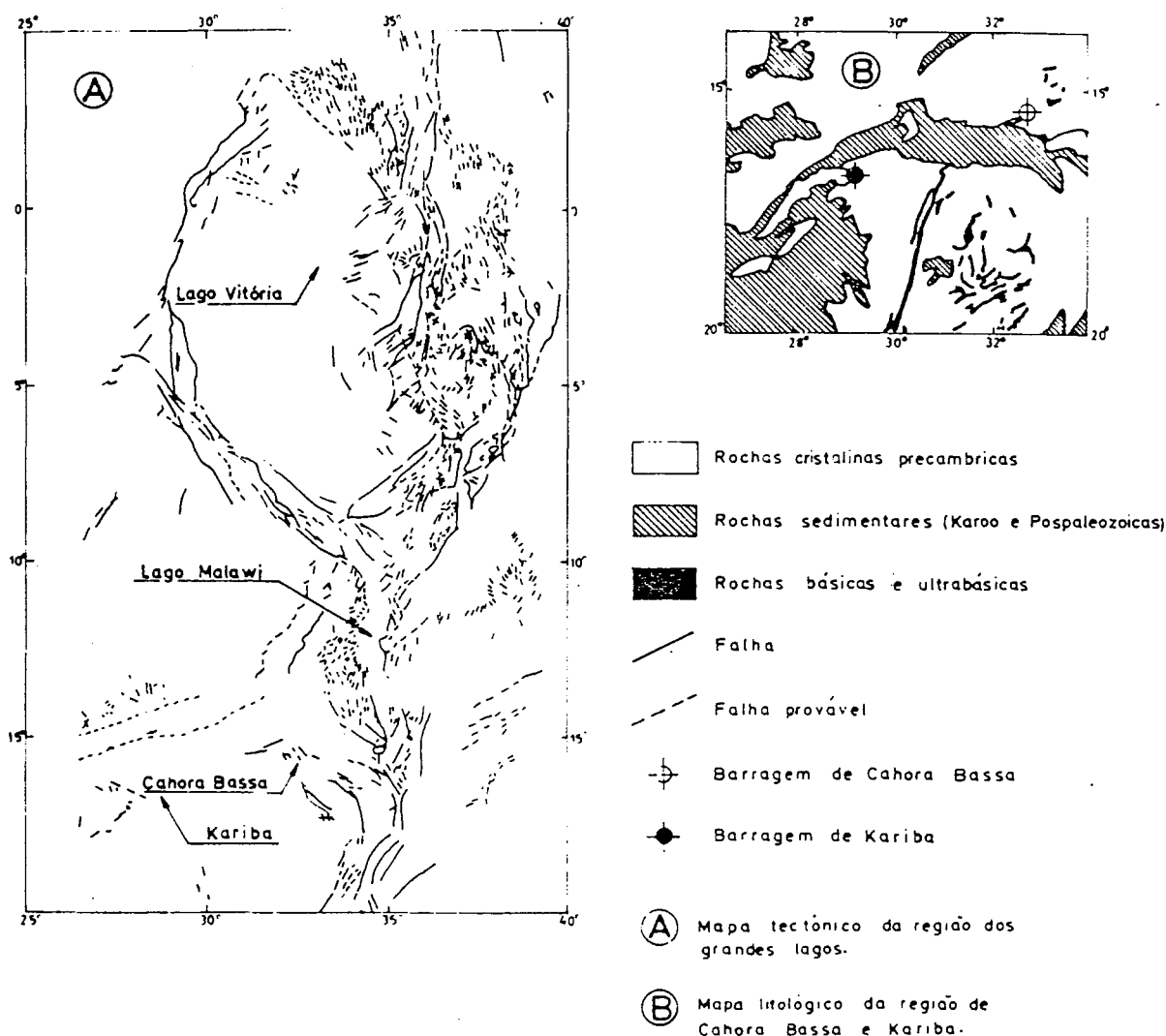


Fig. 15 - Esboço da tectónica e litologia regionais (adaptado de Jain e Regan 1982).

Estudos efectuados no lago Niassa (Ebinger et al 1987) revelam elevados fluxos térmicos por debaixo do lago e intensa actividade hidrotermal ao longo das falhas normais que constituem a bordadura da depressão. Estas falhas, que apresentam um comprimento caract-

LNEC-Proc. 43/13/9208

terístico de 100 km, ocorrem a intervalos discretos ao longo da extensão do rift. Os sucessivos episódios de actividade tectónica distensiva provocam a sua propagação lateral, aumentando progressivamente o número de falhas de bordadura e o comprimento e número de falhas transcorrentes (deslizamento horizontal devido a tensões de cisalhamento). Este mecanismo associado a concentração de forças de tracção nos seus extremos origina a progressão do rift, com o estilo ziguezagueante que caracteriza este tipo de estruturas.

A actividade sísmica que ocorre nesta região resulta, assim, da libertação das tensões concentradas em determinadas zonas de fractura (basculamento de falhas normais e falhas de desligamento originadas por tensões de corte). É natural que, por esse motivo, o potencial sísmico seja mais elevado nas zonas correspondentes às frentes de propagação da estrutura, onde as concentrações de tensões são certamente mais elevadas.

iii) Próximo da barragem, a seguir à foz do rio Nhacanzira, o rio Zambeze escavou um canhão no vale apertado, ainda jovem, em formações pertencentes ao Precâmbrico superior. Trata-se de rochas predominantemente granito-gnaissicas e graníticas, onde ocorrem em locais de reduzida expressão afloramentos de rochas gabro-dioríticas e de granulitos.

A alteração que se regista nesta zona à linearidade do vale entre a fronteira e a foz do rio Nhacanzira, atrás referida, originando inflexões de 90° no percurso e o conseqüente ziguezaguear do rio na zona de Cahora-Bassa, denota uma influência marcadamente tectónica. Aparentemente, o grande bloco do maciço antigo que aqui é atravessado pelo Zambeze, forma uma estrutura em degraus que descem desde o planalto do Songo (cota 1000m) até à peneplanície circundante (cotas inferiores a 350m). As características geomorfológicas, litológicas e tectónicas apontam para uma dinâmica evolutiva enquadrante do tipo "rifting", de que resulta a formação de um demi-graben no sector a sul do maciço do Songo. A ocorrência de fontes de água quente ao longo de algumas falhas que cortam aquele maciço poderá constituir também um indício de uma situação desse tipo, se tivermos em conta aspectos idênticos observados nas zonas de rift anteriormente referidas, de que o testemunho mais próximo identificado é o graben do Lago Niassa (Lago Malawi).

### 3.2.2 - Caracterização local

i) As rochas com maior expressão local são as de tendência granítica, que incluem granitos com amplas características texturais e granulométricas, apresentando, frequentemente, disposição orientada dos minerais, por vezes francamente gnaissica. Predominam os granitos e gnaisses de tendência porfiróide e porfiroblástica, respectivamente, sendo os fenocristais e porfiroblastos constituídos fundamentalmente por feldspato e quartzo, aquele por vezes com tons rosados.

As suas características petrográficas e mineralógicas aproximam-nas dos granitos e gnaisses com expressão regional ocorrentes no Distrito de Tete e reconhecidos a norte do rio Zambeze (Lamy e Coelho 1945).

Foram, ainda, reconhecidos no local da barragem alguns veios de aplito, de pórfiro e de pegmatito, bem como filões gábricos e lamprofiricos.

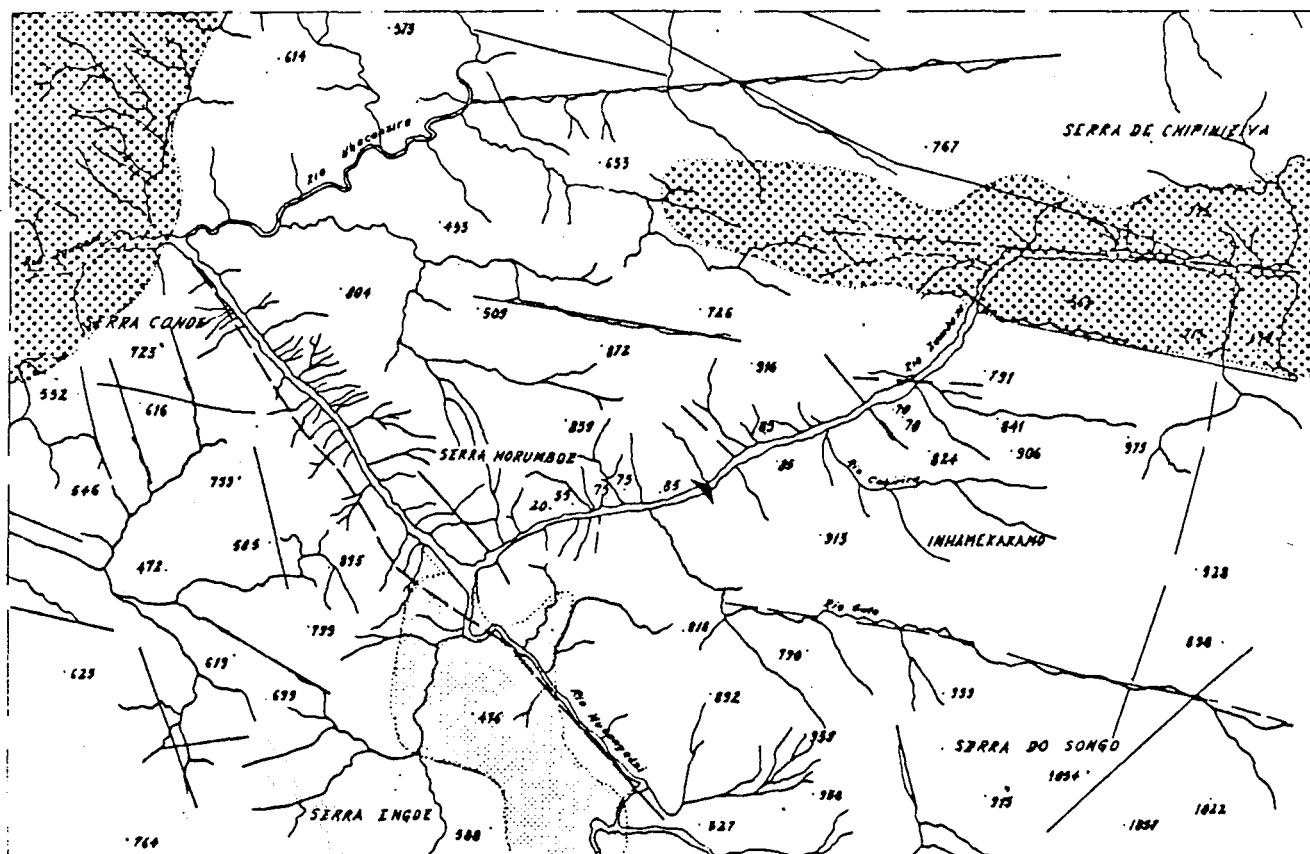
Ter-se-ão processado na região três fases tectónicas (Santos 1963) que terão dado origem a três sistemas distintos de feições estruturais, nomeadamente falhas, diaclases e outros tipos de alinhamentos não caracterizados. Esses três sistemas, então designados por Nhimbe, Cabora-Bassa e local, integrariam as famílias de diaclases 1, 2 e 3, respectivamente, adiante descritas.

Na Fig. 16 apresenta-se a planta geológica da zona da albufeira próxima da barragem, e nas Fig. 11 (já referida) e 17 apresentam-se perfis do local de implantação da barragem com a referência das características litológicas ocorrentes, obtidas com base nas sondagens de reconhecimento efectuadas (Thadeu 1967).




A fracturação observada no reconhecimento geológico de superfície (Thadeu 1967) conduziu à identificação de quatro sistemas principais de diaclases:





- 1 - N65° - 80°W, SV (subvertical)
- 2 - N20° - 50°W, SV (V<sub>1</sub>)
- 3 - N10° - 30°E, SV (V<sub>2</sub>)
- 4 - SH (subhorizontal) (H)

O tratamento estatístico efectuado posteriormente permitiu agrupar as fracturas em três sistemas que se identificam basicamente com os sistemas 2, 3 e 4.



LEGENDA :

-  Rochas gabbro-doríticas
-  Complexo granito-gneissico
-  Complexo gneisso-migmatítico

-  Falhas observadas
-  Falhas prováveis
-  Limites geológicos observados
-  Limites geológicos fotointerpretados


 Barragem de Cahora Bassa

Fig. 16 - Planta geológica da zona circundante da barragem de Cahora-Bassa (adaptado de Santos 1963):

A gnaissosidade e a orientação dos fenocristais de feldspato

apresentam orientação com direcções variáveis entre N50° - 80°W.

ii) Na fundação do encontro esquerdo da barragem ocorre gnaisse granitoide que é atravessado, na base da encosta, por um veio espesso de granulito.

A qualidade dos dois tipos de rocha e do contacto entre si revelou-se boa no interior do maciço para além da zona superficial mais alterada e fracturada, com uma espessura aproximada de 20 m.

No gnaisse granitoide a fracturação é pouco intensa (espaçamento = 10 m), ocorrendo numa zona restrita, laminada, uma intensificação dessa fracturação (espaçamento = 5 m).

No fundo do vale ocorre também predominantemente gnaisse granitoide que é atravessado por alguns filões de gabro olivínico e de lamprófiro (rico em piroxena - augite - ou em anfíbola - tremolite-).

Estes filões de lamprófiro (Fig. 17) são acompanhados, a tecto e muro, por faixas de gnaisse glandular.

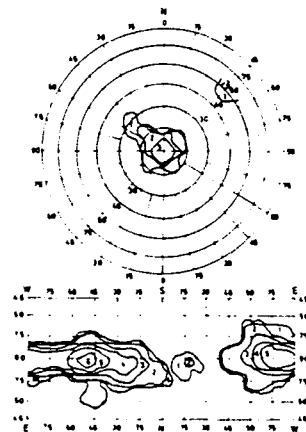
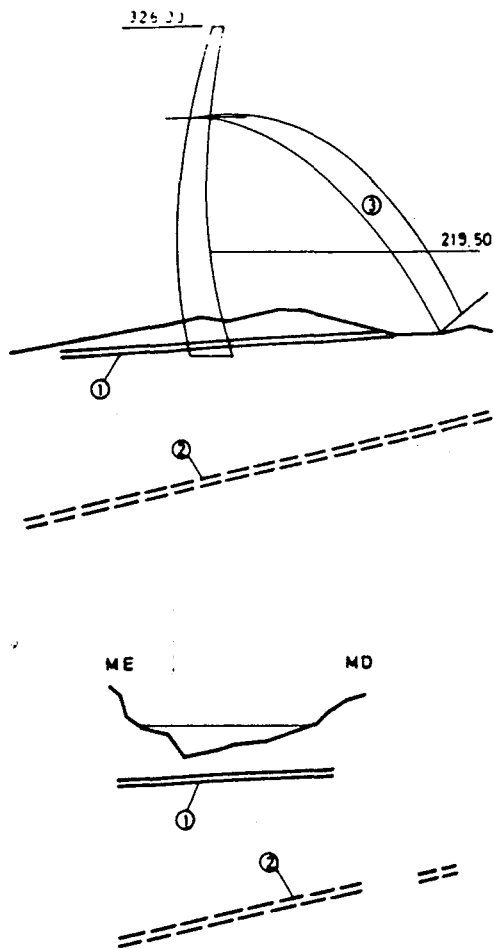
O espaçamento entre fracturas varia de meio metro à superfície a cerca de 5 m a profundidades da ordem dos 20 m.

Na fundação do encontro direito é, ainda, o gnaisse granitoide que domina a litologia. A base da encosta é atravessada por filões e veios de lamprófiro encaixados por faixas de gneisse glandular. A densidade de fracturas é idêntica à já referida na margem esquerda.

A análise dos tarolos das sondagens de reconhecimento e dos ensaios de absorção de água (Thadeu 1967) permitiram concluir que as fracturas no interior do maciço tinham espaçamento elevado, geralmente superior a 5 m, se encontravam fechadas e sem preenchimento, e que a maior frequência de fracturas ocorre segundo faixas, regularmente espaçadas, mais ou menos contínuas, ao longo do maciço.

iii) Ainda, com base nos resultados das análises petrográficas efectuadas (Barros 1967) a amostras recolhidas dos tarolos dessas sondagens, elaborou-se o quadro 4, onde se discriminam os principais minerais detectados.

Analisando as ocorrências de minerais referidos no quadro, verifica-se que não é aparente qualquer variação significativa na composição petrográfica da rocha de fundação. Sómente apresentam significado as diferenças composicionais entre o granito gnaissico,



1	A < 100	4	A < 10 e 20
2	A < 200	5	A < 20 e 40
3	A < 400	6	A > 40

SISTEMA DE FRACTURAS	DIREÇÃO PREDOMINANTE	INCLINAÇÃO PREDOMINANTE
V1	N 40° W	80° N 50° E
V2	N 14° E	80° N 75° W
H	N - S	2° E

Número total de fracturas observadas N = 287  
 Densidade de fracturas A = 200  $\frac{m}{m^2}$ , sendo A o nº de fracturas de carácter "vazias abertas"

- ① Filão lamprofírico de gneisse glandular
- ② Zona bréichica e laminada
- ③ Jacto das descargas

Fig. 17 - Principais acidentes geológicos e sistemas de diaclases da fundação (adaptado de Thadeu 1967).

Quadro 4 - Composição mineralógica das rochas existentes no local da barragem de Cahora-Bassa.

AMOSTRA		QUARTZ	FELDSPATOS							MICA BIOT	PIROXENA			ANFIBOLA		APA- TITE	CLO- RITE	OLI- VINA	DESIGNAÇÃO
SOND	PROF		ORT	MICR	MI-PE	ALB	OLIG	O-AN	LAB		ENST	HIP	AHC	HORN	TREM				
B1	29,80	●	●	●	●	●				●			●		●			Granito gnaissico regional(GGR)	
B1	47,59	●	●	●	●	●				●			●			●		Gnaiss granítico róseo(GGR)	
B1	58,83	●	●	●	●	●					●							Gnaiss granítico claro(GGC)	
B1	107,90	●	●	●	●	●												Granulito(G)	
B1	117,03	●	●		●	●				●								(GGR)	
B1	143,90	●		●	●		●	●		●	●	●	●					(GGR)	
E	52,65	●	●		●					●		●						Lamprófiro(L)	
F	17,52	●	●	●	●						●							(G)	
F	25,30	●	●	●	●													(G)	
F	51,95	●	●		●					●			●		●			(L)	
F	54,60	●	●		●		●					●			●			(GGR)	
G	26,70	●	●	●	●	●				●								(GGC)	
G	51,70	●	●	●	●	●				●								(GGR)	
H	55,30	●			●	●				●								(GGR)	
H	57,73	●			●	●				●								(GGC)	
H	107,69	●		●	●	●				●	●		●					(GGR)	
K	57,80	●			●					●			●		●			(GGR)	
M	0,70	●	●		●	●	●											(G)	
N	35,00	●			●	●	●				●		●					(GGR)	
N	49,00	●			●	●	●				●		●					(GGR)	
P	10,90	●	●	●	●	●				●			●					(GGR)	
P	60,00	●	●	●	●	●		●	●		●		●					(GGC)	
Q	30,00	●						●	●		●							Gabro Biotítico Olivínico	
R	11,70	●	●	●	●													(G)	
S	1,80	●	●	●	●													(G)	
S	25,00	●	●		●	●					●							(GGR)	

o granulito, o gabro biotítico olivínico e o lamprófiro. A primeira daquelas rochas constitui o que se poderia impropriamente chamar a matriz do maciço de fundação, existindo as restantes como bolsadas e inclusões do tipo filoniano dispersas na matriz.

Pode-se, desta forma, considerar que petrograficamente a rocha de fundação apresenta, globalmente, a composição do granito gnaissico regional (por vezes charnoquítico devido à presença de hiperstena).

### 3.2.3 - Caracterização hidromecânica e geoquímica do maciço de fundação

#### 3.2.3.1 - Caracterização hidráulica

Na Fig.11 indicam-se, também, os resultados dos ensaios de

absorção de água efectuados nas sondagens quando da sua realização. Trata-se de elementos que valem sómente como indicadores localizados das condições hidrogeológicas antes da obra instalada e de efectuado o tratamento da sua fundação.

Não constituem, por esse motivo, base para um julgamento global e actual das condições de condutividade hidráulica do maciço, devendo, mesmo, alguns ser considerados com reserva, como é o caso da sondagem que atravessa verticalmente o encontro direito (Thadeu 1967).

Através deles se pode observar que existiam condições de maior absorção de água na zona do "rin" da margem esquerda e ao longo do encontro da margem direita.

As zonas do maciço atravessadas pelos filões de lamprófiro, a que se associam as faixas de gnaisse glandular, normalmente mais fracturadas, apresentam, regra geral, maiores permeabilidades. O mesmo pode acontecer com as zonas atravessadas por filões granulíticos, embora neste caso, e dadas as normalmente boas condições de ligação granulito-gnaisse granitoide, a sua influência seja menor.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir, embora com algumas reservas, que os valores mais elevados da permeabilidade se registavam nas zonas superficiais e mais descomprimidas do maciço. Em profundidade, a permeabilidade diminuía, tornando-se nula ao longo de extensas zonas que alternavam com pequenas zonas de maior permeabilidade (Thadeu 1967).

O tratamento de impermeabilização efectuado posteriormente (Fig.12 e 13) terá criado condições de menor permeabilidade do maciço de fundação.

### 3.2.3.2 - Caracterização mecânica

Para estudo das características geomecânicas do maciço de fundação, foram realizados ensaios "in situ", em galerias de reconhecimento, e em laboratório (LNEC 1969, 1969a, 1970).

Nos quadros 5, 6 e 7 apresentam-se, resumidamente, os valores obtidos em ensaios para determinação do módulo de elasticidade, das tensões de rotura e do coeficiente de Poisson, e em ensaios para determinação das características de rotura e de deslizamento de diaclases "in situ" e em laboratório, respectivamente.



Os locais indicados como MD (margem direita) e ME (margem esquerda) respeitam aos locais de ensaio situados nas galerias de reconhecimento GD1, GD2 e GE1, GE2 e GE3, respectivamente (Fig.11).

Quadro 5 - Características mecânicas do maciço de fundação determinadas "in situ".

Rocha	Local	MOD. ELASTIC INSTANT. (GPa)		MOD. ELASTIC TEMPO INFINITO (GPa)		CORTE		DESLIZ. DIACLASES	
		VM	DP	VM	DP	C (MPa)	$\phi$ (Deg)	C (MPa)	$\phi$ (Deg)
Granito Gneissico Regional	MD	69.7	20.1	57.1	19.0	1.32	48.0	0.29a)	41.0
								0.34b)	33.4
	ME	78.0	24.6	65.3	23.8	-	-	-	-
Granulito	ME	35.9	5.7	29.6	7.1	1.27	66.9		
Lamprófiro	ME	-	-	-	-	0.38	32.6	0.22	20.3

VM - Valor médio; DP - Desvio Padrão  
 C - Coesão;  $\phi$  - Angulo de atrito  
 a) com alteração; b) sem alteração visível

Como se pode concluir pelos resultados apresentados, os valores do módulo de elasticidade são relativamente elevados, correspondendo os valores mais baixos ao lamprófiro, granito róseo e granulito, apresentando este último a menor dispersão de valores.

O lamprófiro apresenta, também, os valores mais baixos nos ensaios de corte e de deslizamento de diaclases "in situ".

A anisotropia textural e mecânica (valores de E e  $\sigma_x$ ) observada em laboratório, quer no granito gnaissico regional quer no granito gnaissico róseo, apresenta coeficientes com diferenças moderadas entre os valores extremos, que não justificará eventuais diferenciações localizadas no comportamento estrutural do conjunto barragem - fundação.

Quadro 6 - Características mecânicas da rocha de fundação determinadas em laboratório.

Em Labº	MOD. ELASTIC. E (GPa)		TENS. ROTURA $\sigma_r$ (GPa)		COEF. POISSON $\nu$		NÚMERO DE ENSAIOS		
	VM	DP	VM	DP	VM	DP	E	r	
Rocha									
Granito Gn. Reg.	72.9	18.1	0.13	0.03	0.18	0.08	54	54	54
Granito Gn. Rôseo	54.8	9.9	0.13	0.05	0.14	0.05	7	7	3
Gabro	108.1	23.1	0.20	0.05	-	-	4	3	-
Granulito	56.2	9.6	0.17	0.03	0.19	-	6	5	1
Lamprófiro	34.8	14.6	0.10	0.02	0.10	-	6	6	1

Quadro 7 - Características de corte e de deslizamento de diaclases determinadas em laboratório.

Em Labº	CORTE		DESLIZAMENTO DIACLASES		SISTEMAS DE DIACLASES
	C (MPa)	$\theta$ (Deg)	C (MPa)	$\theta$ (Deg)	
Rocha					
Granito Gneissico Regional	3.14	57.0	0.21	45.8	Subvertical
			0.23	46.9	
			0.46	48.0	
			0.33	38.0 45.8	Sub horizontal

### 3.2.3.3 - Caracterização geoquímica

O maciço de fundação da barragem é, como referido atrás, constituído essencialmente por rochas de natureza granítica, com estreitas e locais variações composicionais e texturais no sentido dos granulitos e gabro-dioritos, atravessadas por filões raros de lamprófiro.

Como não dispusessemos de composições químicas de todas essas rochas tentámos através das composições mineralógicas modais (LNEC 1969) reconstruir de forma mais qualitativa do que quantitativa essas composições químicas. O objectivo era possuímos uma base para análise comparativa das composições das águas de percolação com as das rochas atravessadas.

No quadro 8 indicam-se as composições mineralógica e química, em termos de óxidos, tendo esta última, com excepção dos lamprófiros (Rodrigues 1976), sido obtidas, como se disse anteriormente, a partir das suas composições mineralógicas.

Como se pode verificar, o maciço de fundação apresenta composição química de nítida tendência alcalina, no sentido geológico do termo, o que em termos geoquímicos representa uma constituição maioritariamente à base de silicatos de metais alcalinos. Esta característica é-lhe conferida pelos feldspatos alcalinos.

Embora esta nomenclatura não seja verdadeiramente representativa de qualquer sistema de classificação, é a que mais nos interessa para efeitos de consideração das características de alteração e de alterabilidade nas análises que se farão adiante.

No quadro 9 indicam-se as composições químicas de rochas típicas com características idênticas às ocorrentes na região de Cahora-Bassa (Hatch et al 1949).

Da análise dos quadros 8 e 9 verifica-se que as rochas do maciço de fundação, predominantemente graníticas, apresentam composição química dominada pela presença de sílica, proveniente do quartzo e dos feldspatos, e de alumina, potássio e sódio, provenientes dos feldspatos.

Com base nestas características, e tendo em consideração os elementos constantes da Fig. 4 (alínea 2.2.2.3), pode deduzir-se, qualitativamente, o escalonamento das rochas existentes em termos de alterabilidade. Assim, teremos, da mais susceptível à

Mineral	Composição Química %										Comp. Mineralógica %					
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	G80	GGR	GGr	GGc	G	L
Quartzo	100										-	32.9	25.7	40.0	43.7	2.4
FELDSPATO	Ortoclase	64.7	16.9			18.4					65.1	57.5	67.4	54.1	54.5	44.6
	Microclina			x												
	Microperthite			x												
	Albite	68.8		10.8			19.4									
	Oligoclase	62.4		8.8	5.0		23.7									
	Olig. Andesina	61.2		8.3	6.0		24.6									
	Labrador	43.3			20.1		36.6									
Biotite	32.8-44.9	6.2-11.4			0.3-28.3	9.4-31.7	2.7-27.6	0.1-20.7		9.2	0.5	0.8	1.3	-	30.3	
PIROXENA	Enstatite	60				40					18.3 + Oliv	4.4	-	1.1	0.1	12.5
	Hiperstena	x ≤ 60				x < 26		x > 14								
	Augite	x			x	x	x	x								
ANFIBOLA	Hornblenda			x	x	x	x	x			-	1.6	1.4	1.0	-	-
	Tremolite	58.8			13.8	24.6										
Apatite				53.8					6.8	41		x				
Clorite	28.3-33.9			0-9	17-34.5	13.1-17.6	1.8-12.2	0-3					x			
Olivina	32-47				45-50		8-20				x					
Restantes											7.4	3.1	4.7	2.5	1.7	10.2
											100%	100	100	100	100	100

Elemento que se presume presente em % desconhecida

Quadro 8 - Composição química das rochas de fundação estimada da sua composição mineralógica.

menos susceptível a fenómenos de alteração ambiental, a seguinte sequência:

gabro, lamprófiro, gnaisse granítico regional, gnaisse granítico claro, gnaisse granítico róseo e granulito.

Trata-se, desta forma, de um maciço de fundação com características de elevada resistência à alteração por fenómenos ambientais superficiais, com excepção das zonas localizadas de lamprófiro. No entanto, existe sempre a possibilidade de ocorrência de fenómenos modificadores dessas características globais, como sejam os efeitos associados a fenómenos de geodinâmica interna e externa (cataclase e outras acções termomecânicas) sofridos pelos minerais constituintes das rochas, os quais poderão, em certas situações, alterar aquela ordem de precedência.

Quadro 9 - Composição química de rochas das famílias das existentes em Cahora-Bassa.

Rocha	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Rest
Granito I Charnoquítico	77.47	11.00	1.04	2.02	0.43	1.02	2.86	4.14	0.25	0.26	-	-
Gabro II Olivínico	46.39	26.34	2.02	3.15	4.82	15.29	1.63	0.20	0.58	0.26		1.03
Lamprófiro III (mineto)	49.45	14.41	3.39	5.01	8.26	6.73	2.54	4.69	2.43	1.23	0.61	1.25

- I - Charnoquítico de Madras
- II - Lacólito de Cuillin
- III - Mineto de Osann

Como é sabido, a susceptibilidade à alteração de um dado mineral ou rocha varia não só em função das características do meio (propriedades extrínsecas), mas também em função das suas propriedades intrínsecas, nomeadamente da superfície de contacto com o veículo de alteração, neste caso a água de percolação, e também com a sua drenagem. Assim, o estado de divisão, devido à fracturação a nível de matriz rochosa, e sobretudo dos minerais, poderá conduzir a situações de elevada susceptibilidade à alteração, com a consequente deterioração profunda e mais ou menos rápida da matriz rochosa.

### 3.3 - Obras de impermeabilização e drenagem

Dada a grande altura da barragem, a envergadura das obras subterrâneas adjacentes e a ocorrência de zonas do maciço com maior desenvolvimento de fracturas associadas a filões de lamprófiro, de gabro e de granulito, as obras de tratamento do maciço ganharam uma grande dimensão.

Nas Fig. 12 e 13 apresentam-se, de forma muito resumida e esquemática, as principais obras de impermeabilização e drenagem da fundação da barragem.

A consolidação e impermeabilização interessaram um volume bastante grande do maciço, representado pela zona a ponteadado. A cortina de impermeabilização inclina cerca de 25° para montante e atinge profundidades da ordem de 120 m.

A drenagem do maciço é também, como se pode ver, bastante extensa. Na margem direita a sua maior extensão e penetração no maciço deve-se à existência das obras subterrâneas, nomeadamente das galerias das tomadas de água para alimentação da central sul.

Foram executados cerca de 290 drenos perfazendo um comprimento de 16000 m aproximadamente, cuja distribuição se indica no quadro 10.

Quadro 10 - Características da rede de drenagem da fundação da barragem.

Zona da fundação	Nº de drenos	Comprimento total (m)
Galeria de drenagem Periférica (GP)	36	1440
Galeria de drenagem de fundação (G145)	93	5875
Galeria de fundação e de encosta da margem esquerda (GE5 + TGE5)	65	3499
Galerias de fundação e de encosta da margem direita (GD5 + TGD5)	95	5165
TOTAL	289	15979

## 4 - COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO OBSERVADO

### 4.1 - Observação das acções

#### 4.1.1 - Acções da água

##### 4.1.1.1 - Pressão hidrostática

A pressão hidrostática, materializada pela altura de água na albufeira, é analisada de uma forma simples e genérica considerando somente a cota da superfície livre da água. A sua evolução está patente na Fig. 18.

Após o primeiro enchimento da albufeira, que se processou entre DEZ 74 e JUN 76, o regime de exploração seguido deu origem à manutenção de níveis elevados, com oscilações anuais que variaram entre os 315 e 327 m até 1978, e que entre este ano e 1981 foram reduzidas para o domínio dos 320 aos 327 m. A partir de 1981 o regime de exploração da albufeira passou a situar os níveis no domínio dos 311 aos 320 m.

O regime de afluências à albufeira de Cahora-Bassa apresenta valores máximos no primeiro trimestre do ano, centrados em Fevereiro-Março, e valores mínimos no segundo semestre, centrados em Julho-Agosto (quando se trata de período seco) ou em Setembro-Outubro (quando se trata de período húmido) (HCB 1987).

Daí resulta que a exploração da albufeira, designadamente o domínio de cotas a atingir ao longo do ano, esteja dependente, entre outros factores, daquele regime.

Por esse motivo os níveis máximos anuais ocorrem, geralmente, entre Abril e Junho e os mínimos em Dezembro e Janeiro (Fig. 18).

##### 4.1.1.2 - Subpressão

As subpressões instaladas na base da barragem e no maciço de fundação, cuja acção é importante no desenvolvimento das condições de estabilidade da obra, deveriam ser analisadas neste capítulo. Porém, como os piezómetros que as registam têm sido também utilizados para a medição de caudais percolados, a análise piezométrica é feita conjuntamente com os caudais drenados, optando-se por in-

clui-la nas alíneas relativas à análise do comportamento hidráulico da fundação (alíneas 4.2).

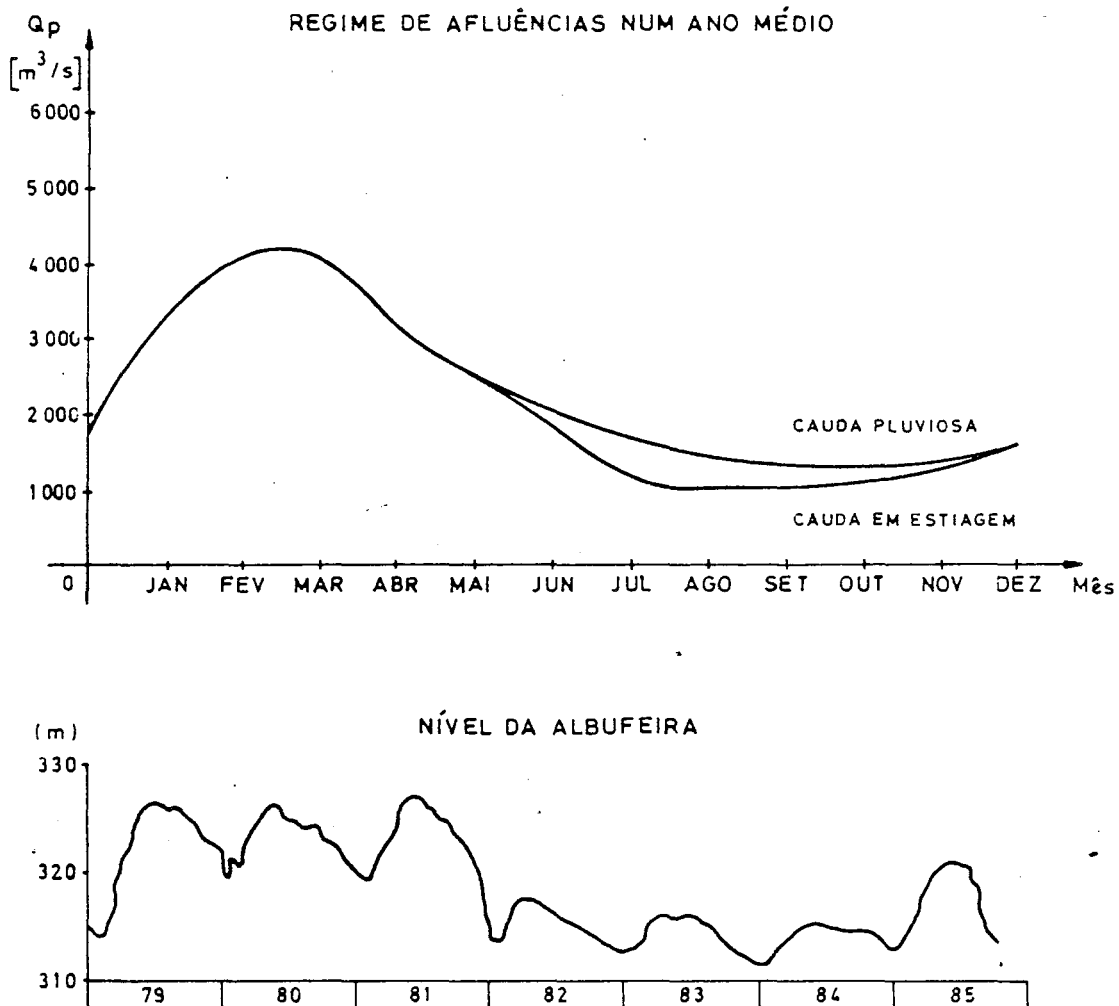


Fig. 18 - Regime de afluências e evolução dos níveis da albufeira entre 1979 e 1985.

#### 4.1.1.3 - Hidroquímica

Os fenómenos de natureza química actuantes sobre a estrutura, a fundação e os maciços envolventes do reservatório são veiculados predominantemente pelas águas de circulação, aérea, superficial e subterrânea. Estas fazem incidir a sua acção sobre os materiais constituintes desses meios com taxas de agressividade que são sobretudo função da qualidade da água e da composição química e mineralógica desses materiais. Naturalmente, estas taxas são ainda dependentes de outros factores, de que se destacam a temperatura, a pressão, a superfície e o tempo de contacto.

Dado que no Cap.5 se tratam as questões relacionadas com os



fenómenos hidrogeoquímicos, resultantes da percolação da água através das estruturas (em particular da fundação), considerou-se vantajoso incluir e desenvolver aí os aspectos relativos às acções hidroquímicas das águas infiltradas (ponto 5.1 - Composição química da água da albufeira).

#### 4.1.2 - Acção das variações de temperatura

No local onde se situa a barragem, a onda térmica anual do ar, ao nível do coroamento, apresenta uma amplitude de variação bastante pequena, da ordem de 5,8°C, e um valor médio de 26,8°C. Os valores mínimos anuais da temperatura ocorrem em meados de Junho e os valores máximos em meados de Dezembro.

Na Fig. 19 (gráfico A) apresenta-se a curva da onda térmica anual, obtida por aplicação, às temperaturas médias mensais observadas, do seguinte modelo estatístico:

$$T_o = T_c + T_r$$

em que:

$$T_c = T_m + a \cos \theta + b \sin \theta$$

sendo:

$T_o$  - temperatura média mensal observada

$T_c$  - temperatura média mensal calculada

$T_r$  - residuo

$T_m$  - temperatura média anual

$$\theta = \frac{2\pi.d}{365}, \text{ dia do ano em radianos}$$

O modelo foi aplicado ao período de Janeiro de 1975 a Dezembro de 1985, num total de 129 equações, que foram resolvidas pelo método dos mínimos quadrados.

Na mesma figura (gráficos (B) a (H)) representam-se, também, as curvas da onda térmica anual obtidas, para um conjunto de termómetros distribuídos no betão da estrutura, pela aplicação do modelo atrás referido a épocas de observação entre JAN 75 e DEZ 85.

Têm estas curvas como objectivo mostrar de forma expedita a evolução da temperatura do betão ao longo do ano nos pontos escolhidos e, com base nessas variações, criar a percepção da sua contribuição para a evolução das grandezas relacionadas com o com-

LNEC-Proc. 43/13/9208

portamento hidromecânico da fundação (alínea 2.2.3) que se pretendem analisar no presente trabalho.

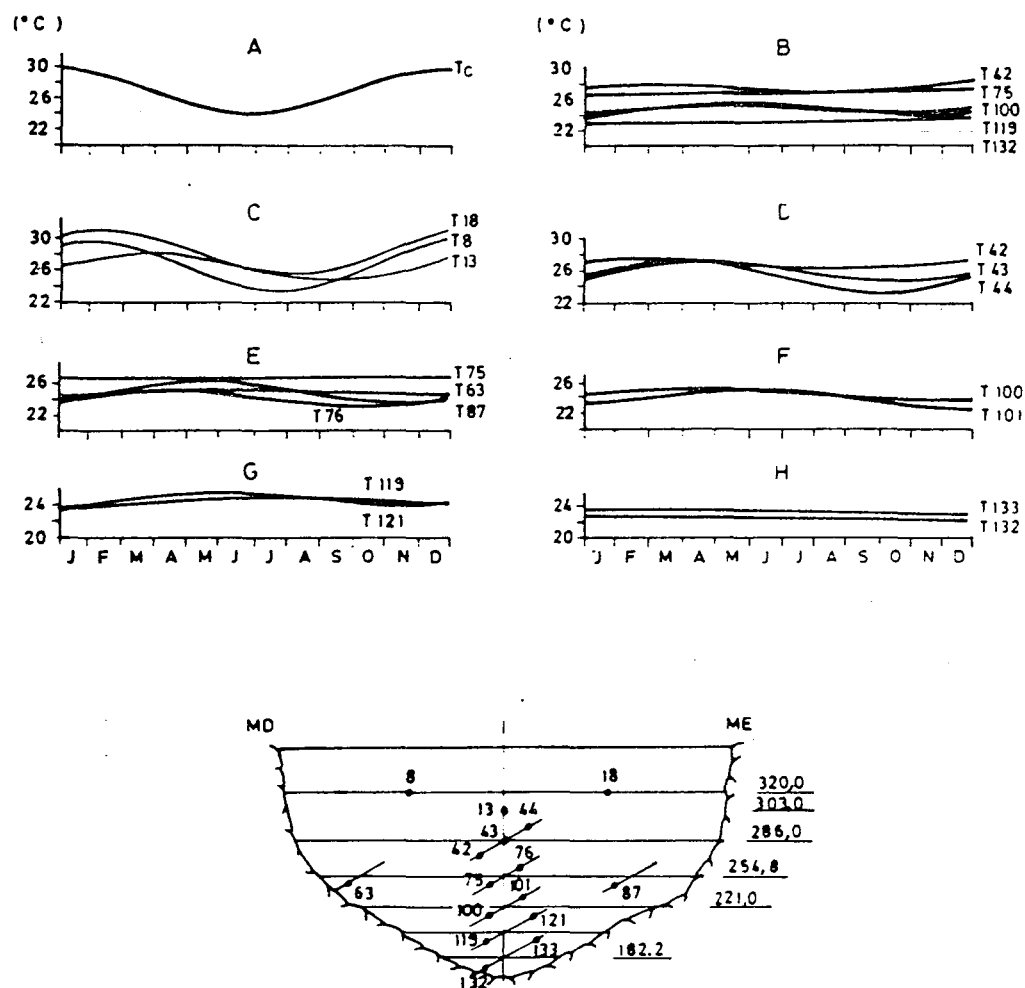


Fig. 19 - Caracterização das variações anuais de temperatura no ar e no betão entre 1975 e 1985.

Da sua análise pode concluir-se que:

- as amplitudes de variação diminuem não só com a cota de medição, o que é natural, mas também de montante para jusante;
- revelam um ligeiro aumento no sentido da margem direita para a margem esquerda ((C) e (E)), fenómeno a que não será estranha a orientação da barragem face à incidência dos raios solares;
- geralmente, a transferência de calor se dá de montante para

jusante na zona superior da estrutura ((D) e (E)), cujo limite inferior se situa a uma cota próxima de 230m, e, para cotas inferiores, essa transferência é alternadamente de montante ou de jusante conforme a época do ano; junto à base ((F), (G) e (H)) parece voltar a ocorrer fluxo constante de calor de montante para jusante;

- a temperatura a jusante, ao longo do fecho da abóbada, decresce progressivamente com a cota, sendo insignificantes as amplitudes anuais registadas ((B)).

Analisou-se também a variação do estado térmico da água na albufeira, em especial próximo do fundo do reservatório, tendo-se, para o efeito, utilizado as temperaturas fornecidas por termómetros instalados na água e fixos ao paramento de montante. Embora a sua localização, junto ao paramento, possa introduzir alguma diferença em relação aos valores da temperatura real da massa líquida, motivada pela temperatura do betão, admitem-se as temperaturas fornecidas como ordem de grandeza.

A temperatura média anual da água próximo da fundação varia entre 25°C para cotas superiores a 285m e 23,5°C no fundo.

Na zona do lado da margem direita essas temperaturas são ligeiramente mais baixas do que do lado da margem esquerda.

Os desvios padrões calculados para a variação anual da temperatura decrescem de 2,7°C a 2,4°C entre as cotas 285m e 220m, baixando bruscamente para 1,0°C entre esta cota e 195m, abaixo da qual decrescem para 0,7°C à cota 182m, próximo do fundo.

Verifica-se, assim, existirem variações anuais da temperatura da água na albufeira, junto à barragem, de reduzido valor, que diminuam com a cota.

As temperaturas mais elevadas da massa líquida registam-se nos meses de Janeiro a Março, chegando a atingir próximo do fundo valores da ordem dos 25°C. Nos meses de Setembro e Outubro registam-se as temperaturas mais baixas, podendo observar-se também, próximo do fundo e na mesma zona, valores da ordem dos 21°C.

Por outro lado, a exposição solar mais favorável da massa de água do lado da margem esquerda, aliada à sua relativa maior estabilidade, dado que as tomadas de água se situam na margem direita, é responsável pelas temperaturas ligeiramente mais elevadas da água que se registam nesse sector.

#### 4.1.3 - Acções sísmicas

i) Como se referiu no ponto 3.2.1, Cahora-Bassa situa-se numa região que é dominada pela evolução geomorfológica determinada pela abertura do sistema de rifts da África Oriental (Fig. 15). As evidências locais, a que sucintamente se fez referência, apoiam esta teoria. Nessa conformidade, a actividade sísmica natural da região é controlada pelo estilo tectónico distensivo que está subjacente àquela evolução e que determina os respectivos mecanismos de geração.

Em face deste enquadramento sismotectónico considera-se que a região, e nomeadamente o local onde se instalou a barragem, possa ser alvo de acções dinâmicas provocadas pela ocorrência, com alguma frequência, de sismos. Admite-se que, em regra, e dadas as características tectónicas referidas, a sua intensidade não seja muito elevada.

Estas considerações de natureza empírica, e resultantes da situação geológica conhecida, são corroboradas pelos estudos de índole sísmológica efectuados.

ii) Os estudos de zonamento sísmico elaborados na década de sessenta, pelo então Serviço Meteorológico Nacional sobre Moçambique (Tropa 1970), revelam precisamente que a actividade sísmica reconhecida era mais intensa segundo o alinhamento marcado pelo lago Niassa.

Desse facto resultou que o zonamento do risco sísmico e das intensidades máximas prováveis previstas para a década seguinte (1968-1977) indicasse um claro alinhamento dos seus valores máximos segundo a direcção de desenvolvimento do rift (Fig. 20). Constatou-se, assim, que a barragem de Cahora-Bassa se situa numa zona onde, segundo aquele estudo, e no período que ele visava, se previa baixo a moderado grau de risco sísmico e onde a intensidade máxima provável era de VI (escala internacional).

iii) Relativamente ao desenvolvimento de actividade sísmica induzida pela instalação da albufeira, não foram realizados estudos sismotectónicos que permitissem definir com alguma precisão o nível que esta poderia atingir. No entanto, dadas as características do empreendimento (altura superior a 100 m e volume de reservatório elevado), era de esperar, à semelhança do que aconteceu em Kariba (Zimbabwe), a ocorrência de eventos sísmicos induzidos durante a

fase da acumulação de água, e, mesmo, durante a fase seguinte de exploração.

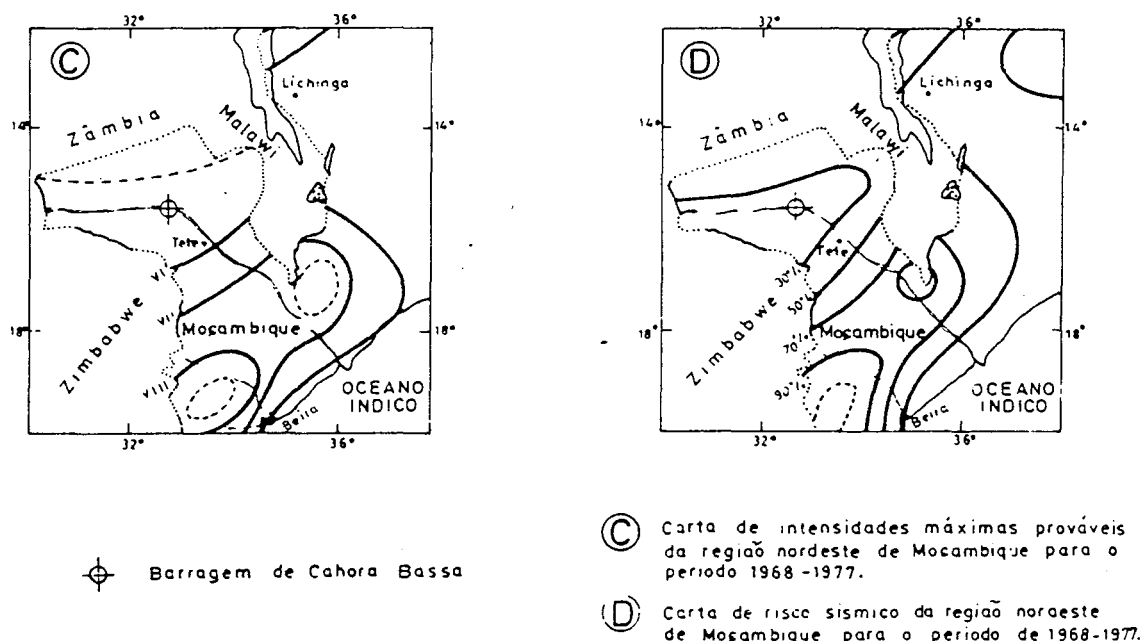


Fig. 20 - Zonamento sísmico da região NW de Moçambique para o período 1968-1977 (adaptado de Tropa 1970).

Em Kariba, onde o enquadramento geológico é ligeiramente diferente, embora se situe na mesma região Oriental de África, eventualmente também influenciada pela evolução do sistema de rifts, registou-se intensa actividade sísmica que foi reconhecida como sendo determinada pela instalação da albufeira.

O sismo que gerou a maior magnitude (6 SI) ocorreu em Setembro de 1963, cerca de quatro anos após o início do enchimento, e quando o nível de água atingiu a cota máxima. Entre 1961 e 1963 foram registados mais de 2 000 sismos gerados ao longo do reservatório ou na sua vizinhança imediata.

Era suposto, assim, que em Cahora-Bassa se pudesse vir a registar actividade sísmica com características idênticas durante e após a instalação da albufeira.

Para a sua observação (LNEC 1973a) foi montada uma rede de observação sismográfica (Fig. 21), constituída por cinco sismógrafos que teletransmitiam a informação (quatro através de rádio e um através de cabo) para o posto receptor e registador instalado junto

ao aeroporto do Songo.

Durante o primeiro enchimento, em 1974-1975, não foi registada actividade sísmica assinalável e a rede foi desactivada em meados de 1975, devido a vários imponderáveis, nomeadamente, dificuldades de manutenção.

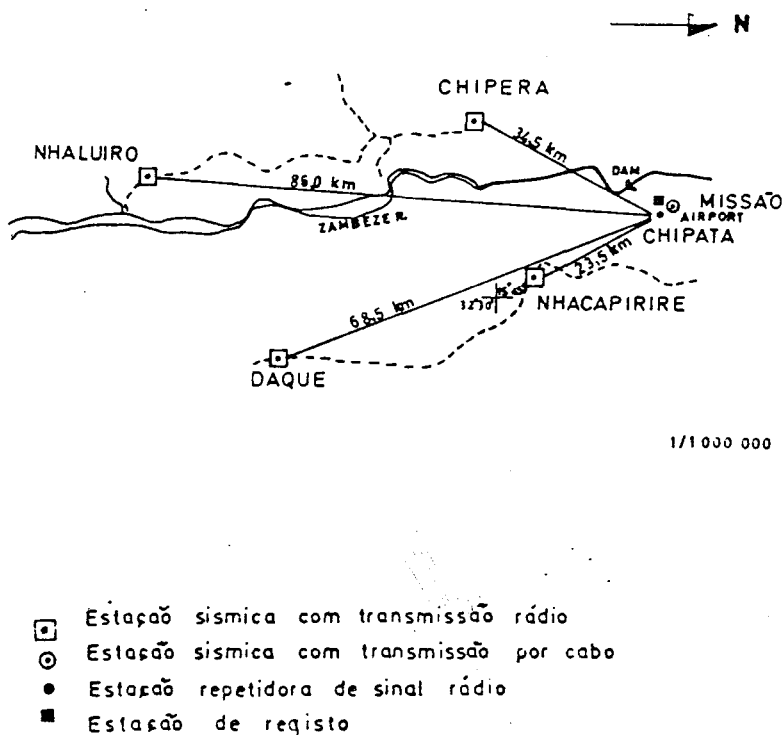


Fig. 21 - Rede de observação sísmográfica da albufeira de Cahora-Bassa.

#### 4.2 - Observação das respostas estrutural e hidráulica

##### 4.2.1 - Deslocamentos observados na base da barragem

##### 4.2.1.1 - Medidos com pêndulos

Na barragem foram instalados pêndulos invertidos nos blocos 0-1, 7-9, 8-10, 13-15 e 14-16 destinados a medir deslocamentos horizontais da estrutura a várias cotas. Na Fig. 11 indicam-se as localizações dos pêndulos e dos pontos onde são feitas as medições.

A análise que se segue diz respeito aos pontos de medição de cota mais baixa. As bases de medida encontram-se em nichos situados ao longo da galeria periférica e nas quais se obtêm os deslocamentos horizontais segundo as direcções radial e tangencial.

A evolução dos deslocamentos observados, entre 1979 e 1985, está representada na Fig. 22.

De uma maneira geral, os deslocamentos máximos observados na base da barragem desde o início do primeiro enchimento são de valor relativamente baixo. Observa-se também que decrescem da zona central, portanto do fundo do vale, para a zona das margens, consequentemente para as cotas mais elevadas da base da barragem.

A partir de 1981 observa-se ligeira tendência, em praticamente todas as bases, para diminuição do valor dos deslocamentos radiais. Se considerarmos a história dos níveis da água na albufeira, em que a partir de 1981 se mantiveram as cotas relativamente baixas, pode-se aceitar o fenómeno como indiciador da tendência da estrutura e da fundação para recuperar a parcela visco-elástica dos deslocamentos impostos pela actuação constante, até então, de níveis mais elevados da pressão hidrostática.

O valor dessa recuperação é maior na zona da base dos blocos 7-9 e 8-10 (base da barragem na zona dos rins) e decresce no sentido das outras zonas observadas, ou seja, da base dos blocos 0-1, 13-15 e 14-16.

Outro indicador dessa situação é o sentido da tendência verificada, também após aquela data, nos deslocamentos tangenciais. Essa tendência parece ocorrer no sentido da margem contrária àquela em que se situa a base de medida.

Trata-se, contudo, de variações de deslocamento de valor bastante reduzido, pelo que é aceitável admitir-se a sua reversibilidade desde que as condições de solicitação, e designadamente a pressão hidrostática, voltem a níveis idênticos aos verificados até 1981.

#### 4.2.1.2 - Medidos com bases de alongâmetro

A observação dos movimentos de algumas juntas de contracção na base da barragem é feita com bases de alongâmetro situadas nas galerias horizontais, por não existirem bases ao longo da galeria

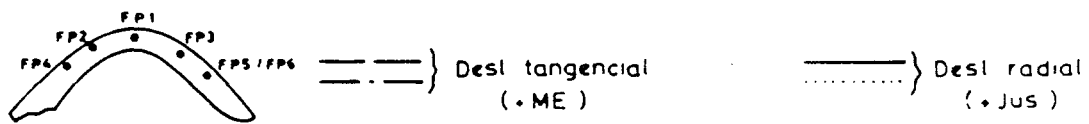
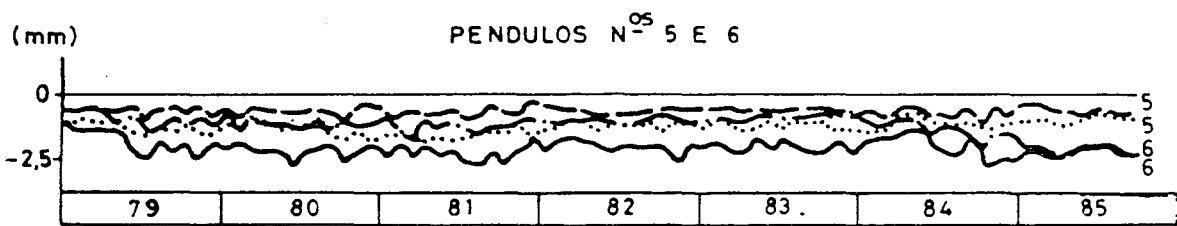
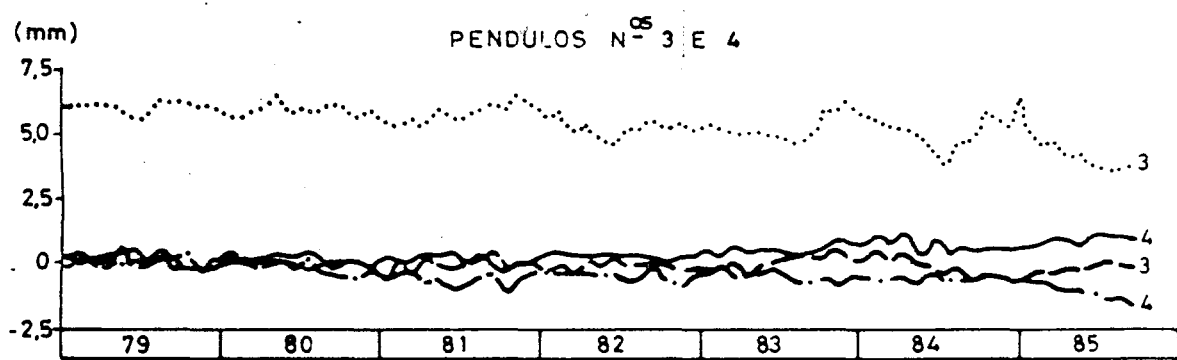
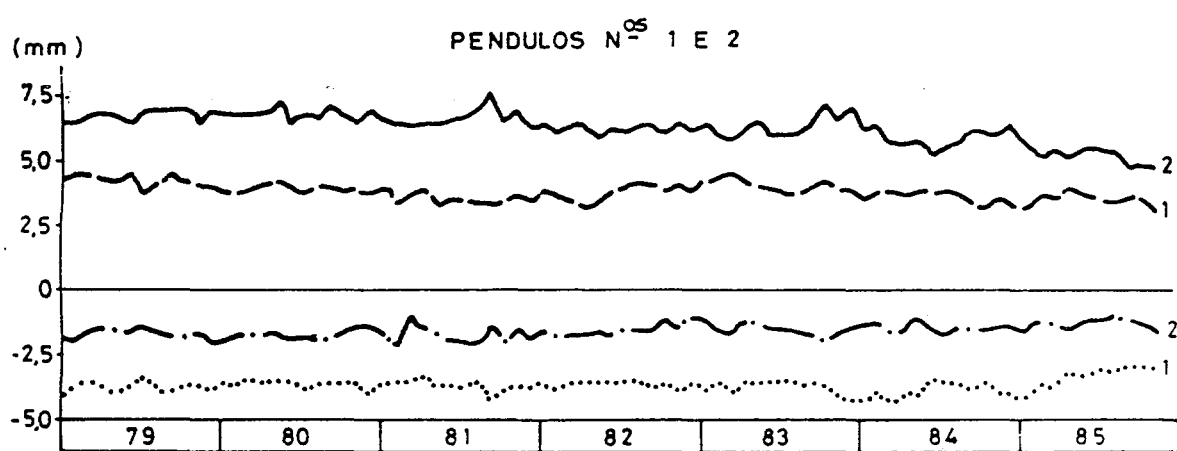
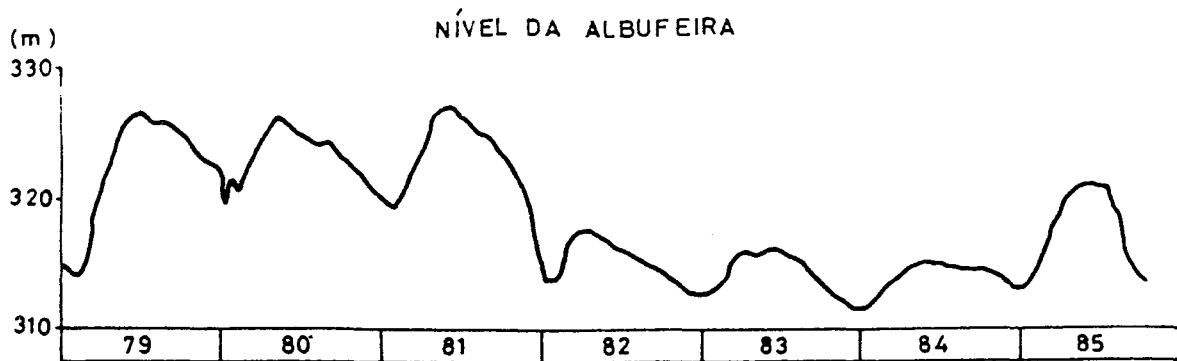


Fig. 22 - Evolução dos deslocamentos horizontais medidos com pendulos na base da barragem.



periférica. Consideram-se nesta análise sómente as bases existentes nas juntas próximas dos extremos dessas galerias horizontais por serem as que mais próximo se encontram da fundação dos respectivos blocos.

Os movimentos medidos são de abertura e fecho, segundo planos e direcções perpendiculares ao plano das juntas, e de deslizamento segundo os planos das juntas e com direcções paralelas a estes, geralmente vertical e horizontal.

No quadro 11 indicam-se as amplitudes máximas de movimento, quer de abertura e fecho, quer de deslizamento, observadas entre Janeiro de 1979 e Dezembro de 1985.

Os valores medidos são pequenos, raramente excedendo 0,05 mm. Constata-se uma maior amplitude dos movimentos de deslizamento do que de abertura e fecho. Por outro lado, verifica-se que, globalmente, a amplitude dos movimentos de abertura e fecho diminui com a cota de colocação da base de medida, existindo entre as duas variáveis uma razoável correlação.

Nos movimentos de deslizamento essa relação com a cota de colocação não é nitida, podendo-se dizer que, apesar disso, é mais notória em relação aos deslizamentos segundo a direcção vertical.

Apesar das amplitudes observadas serem pequenas, é possível, mesmo assim, deduzir alguma influência das variações térmicas de período anual no seu comportamento, em particular nos movimentos de abertura e fecho das juntas. Na realidade, verificam-se as maiores amplitudes dos movimentos de abertura e de fecho entre a época mais quente - fecho - (Novembro a Fevereiro), e a mais fria - abertura - (Maio a Julho).

#### 4.2.2 - Caudais drenados

##### 4.2.2.1 - Análise qualitativa da evolução dos caudais e das subpressões mais significativas medidos em drenos

Seguidamente faz-se a análise qualitativa dos caudais mais significativos debitados por alguns drenos durante a fase de exploração do empreendimento entre 1977 e 1985. Alguns dos drenos analisados estão também instrumentados com manómetros, o que permite observar o nível da subpressão quando, para o efeito, se interrompe o débito de água.

Quadro 11 - Amplitudes do movimento das juntas medido com alongâmetro na base da barragem entre Janeiro de 1979 e Dezembro de 1985.

BASE	P	JUNTA	COTA (m)	AMP. MAX ABERT. (mm)	AMP. MAX DESLIZ. (mm)
45	H	22	297.1	0.1	0.08
46	P	22	296	0.05	0.02
89	H	18	249.6	0.08	0.08
90	P	18	248.5	0.04	0.02
127	H	8	204.6	0.05	0.09
128	P	8	203.5	0.04	0.03
145	H	4	184.6	0.03	0.09
146	P	4	183.5	0.06	0.03
147	H	2	184.6	0.04	0.09
148	P	2	183.5	0.05	0.04
149	H	0	184.6	0.04	0.06
150	P	0	183.5	0.05	0.03
151	H	1	184.6	0.05	0.07
152	P	1	183.5	0.04	0.05
153	H	3	184.6	0.04	0.11
154	P	3	183.5	0.04	0.06
143	H	7	204.6	0.05	0.08
144	P	7	203.5	0.04	0.07
125	H	17	249.6	0.1	0.09
126	P	17	248.5	0.07	0.06

H - na parede da galeria  
P - no piso da galeria

- DGP4 - Apresenta tendência para diminuição do caudal até finais de 1981 com posterior estabilização progressiva em valores muito baixos, quase nulos. A subpressão apresenta uma evolução irregular, facto que poderá dever-se a deficiência do manómetro.
- DGP3 - Mantem valores da ordem dos 2,5 l/min desde o início das observações.
- DGP10 - Apresenta valores praticamente nulos desde o início.
- 224,75/3/A - Em 1977 o caudal diminui, quase se anulando posteriormente. A subpressão decresceu em 1977, quase se anulando até 1983, quando voltou de novo a subir para valores da ordem de 0,3 MPa, evidenciando posterior tendência para progressivo decréscimo.
- DGP13 - Caudal praticamente nulo desde o início. A subpressão, da ordem de 0,4 MPa, baixou em 1980, para voltar a subir em 1983 para cerca de 0,2 MPa, apresentando ligeira tendência para aumento posteriormente.
- DGP7 - Apresenta tendência marcada para decréscimo do caudal a partir de 1977, totalizando uma diminuição de cerca de 15 l/min até 1985.
- DGP43 - O caudal deste dreno acusa as variações da pressão hidrostática, com evolução cíclica de acordo com esta, e anulando-se, praticamente, para valores da cota da albufeira inferiores a 313 m.
- DGP23 - Apresenta caudal praticamente nulo desde o início.
- 30/N/A - O caudal apresenta-se estabilizado, à volta de 1,2 l/min, desde o início. A subpressão, da ordem de 1,8 MPa, baixa em 1977 para cerca de 0,4 MPa, voltando de novo a subir, com estabilização em 1980 - 1983 à volta de 2 MPa.
- 112,5/S/B - Caudal com tendência para diminuição, a partir de 1977, de aproximadamente 5 l/min para 1,2 l/min, em 1985.
- 105/N/A - Apresenta caudal estabilizado, desde o início, à volta de 0,5 l/min. A subpressão apresenta pequenas oscilações em torno de 1 MPa.
- 210/N/A - O caudal apresenta-se estável desde o início, à vol-

ta de 0,5 l/min. A subpressão apresenta pequenas oscilações entre 0 e 0,1 MPa até 1982, subindo, em meados desse ano, para cerca de 0,3 MPa e posteriormente, a partir de Setembro de 1983, nova tendência para subir com estabilização em 1985 à volta de 0,5 MPa.

240/S/A - Tendência para diminuição do caudal, a partir de 1975, de cerca de 3 l/min para valores da ordem de 1,2 l/min em 1985.

225/S/A - O caudal diminuiu progressivamente, a partir de 1976, de valores da ordem de 6 l/min para cerca de 1,3 l/min em 1985. A subpressão apresentou uma descida, entre 1976 e 1979, de cerca de 0,8 MPa para cerca de 0,2 MPa, com posterior acréscimo para 0,6 MPa até 1982, mantendo, a partir de então, alguma estabilidade à volta daquele valor.

Caudal total da margem esquerda - As variações observadas acusam a influência da pressão hidrostática, mostrando, contudo, tendência para diminuição do caudal medido ao longo do tempo; a cota da albufeira evidenciou também, por seu lado, um decréscimo.

Caudal total da margem direita - Os valores observados são, grosso modo, cerca de metade dos da margem esquerda. Não são tão sensíveis às variações de cota da albufeira e evidenciam, também, tendência para decréscimo.

O caudal total drenado na fundação da barragem, que integra as águas afluentes à galeria periférica e à galeria de fundação à cota 145 m, é medido à entrada do poço de bombagem existente na margem direita.

Como se pode observar na Fig. 23 o volume total de água drenada na fundação oscilou entre 85 e 170 l/min até 1981. A partir deste ano, e, naturalmente, em consequência do abaixamento da cota da água na albufeira, aqueles valores caem para pouco mais de 50 l/min, caudal que se manteve posteriormente com muito pequenas oscilações. Mesmo em 1985, quando a cota da água na albufeira voltou a subir cerca de 9 m, não se registou aumento significativo do caudal total drenado.

Este comportamento fica a dever-se ao facto de que a cota da água na albufeira, ao descer abaixo dos 323 m, deixa de influenciar

os drenos situados a cotas mais elevadas, os quais contribuem, nessa situação, com um volume razoável de água drenada e, também, ao facto de que a diminuição da pressão hidrostática conduz, naturalmente, à diminuição da percolação.

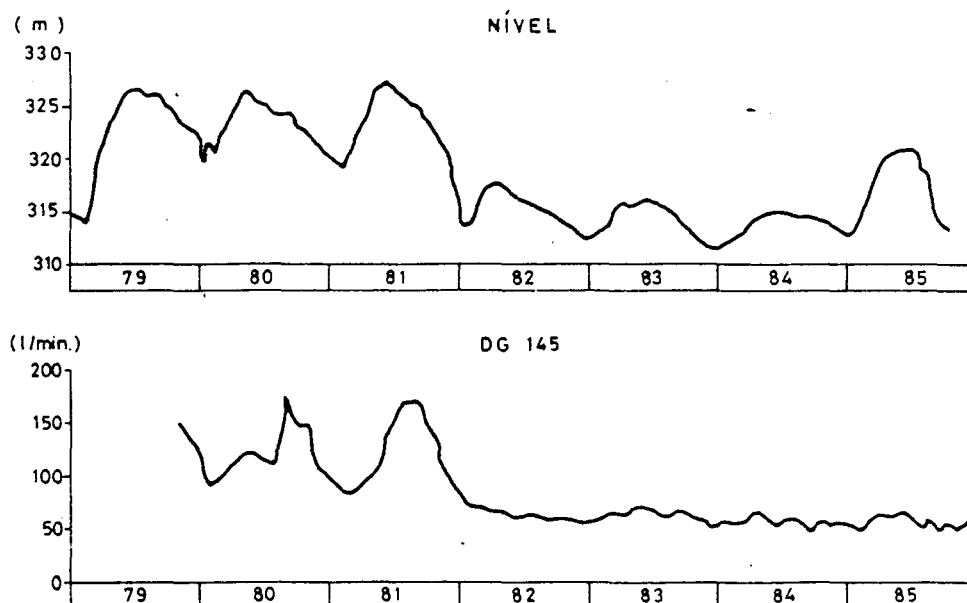


Fig. 23 - Evolução do caudal total drenado na fundação da barragem.

Para melhor compreensão dos aspectos descritos, faz-se seguidamente a análise global dos caudais drenados em cada uma das galerias.

#### i) Galeria periférica

Pode-se dizer que os caudais registados são perfeitamente aceitáveis para uma barragem com este tipo de estrutura e de fundação. Na verdade, para uma cota de albufeira de 327 m, os valores mais altos registados (81.05.26) eram da ordem dos 8 l/min no DGP 43 (bloco 19-21 à cota 296 m) e no DGP 7 (bloco 1-3 à cota 178 m).

A zona onde se registam maiores volumes drenados situa-se entre as juntas 3 e 4, portanto no fundo do vale. As restantes zonas apresentam valores inferiores a 1 l/min.

O dreno DGP 43, situado numa cota elevada e com um caudal

relativamente alto, responde com maior sensibilidade às variações do nível, embora o DGP 7 também responda, mas com menor sensibilidade. Essa sensibilidade é idêntica para o DGP 5, sob o bloco 1-3, e DGP 4, sob o bloco 2-4.

A temperatura parece só ter alguma influência no funcionamento do DGP 43, o que, se atendermos à sua posição (cota elevada), é aceitável.

No entanto, quando os níveis são mais baixos, na faixa dos 311 m - 312 m, a sensibilidade térmica nos drenos do fundo do vale parece ser maior. Para este domínio dos níveis, o DGP 43 reduz substancialmente o seu caudal (<1 l/min), enquanto que os do fundo do vale não acusam reduções significativas. O caudal do DGP 7 continua a situar-se à volta dos 5 l/min.

ii) Galeria á cota 145m

- Drenos ascendentes, dirigidos para jusante

Os caudais não são elevados. O valor mais elevado regista-se no dreno 225/S/A da margem esquerda, dirigido para a zona do bloco 11-13, com cerca de 2,5 l/min. Com um valor da ordem dos 2 l/min está o dreno 165/N/A, dirigido para as zonas dos blocos 5-7 e 7-9. Os restantes apresentam valores inferiores.

As zonas de fundação com maiores infiltrações situam-se nas zonas a montante dos blocos entre as juntas 3 e 13 (da margem esquerda) e entre as juntas 1 e 8 e do bloco 8-10 (da margem direita).

Os maiores volumes drenados registam-se na zona dos blocos entre as juntas 4 e 9, portanto na zona inferior do vale sobre a margem esquerda.

Para cotas da albufeira inferiores a 316 m os caudais praticamente anulam-se. Por outro lado, as variações do nível parece terem pouca influência nos caudais drenados nestas zonas. O mesmo se pode dizer da acção térmica. Trata-se de zonas que, geralmente, sofrem pequena influência do funcionamento térmico da superestrutura.

- Drenos descendentes, dirigidos para montante

Os caudais não são elevados, geralmente inferiores a 1 l/min. Excepção para o dreno 82,5/N/B, com cerca de 3 l/min, em frente da zona limitada pelas juntas 1 e 4, e para o dreno 112,5/S/B, com

cerca de 2 l/min, em frente da zona limitada pelas juntas 2 e 6.

Os maiores volumes drenados situam-se nessas zonas e, ainda, na zona entre as juntas 1 e 9. É portanto na zona do fundo do vale, a montante, que se registam os maiores volumes de água drenada.

Tal como se referiu para os drenos ascendentes, para níveis inferiores à cota 316 m, tudo leva a crer que os caudais se anulam.

#### 4.2.2.2 - Ensaios efectuados na rede de drenagem em 1985

No decurso da inspecção efectuada em Novembro de 1985 procedeu-se a uma campanha de medição de caudais em toda a rede de drenagem da fundação da barragem e, também, à medição, em alguns drenos, das subpressões que se instalaram no maciço quando obturados.

Na Fig. 24 representam-se, graficamente, os valores dos caudais e das subpressões medidos em 85.11.15 na rede de drenagem, nas câmaras superiores dos piezómetros de montante dos leques piezométricos da galeria periférica, e na galeria de fundação à cota 145 m. O nível da água na albufeira encontrava-se à cota 312,56 m.

Relativamente aos caudais, pode observar-se que:

- Nos drenos da galeria periférica os caudais drenados são de reduzido volume, geralmente inferiores a 1 l/min, na maioria dos casos, mesmo, muito inferiores. Os valores mais elevados situam-se na zona do fundo do vale e distribuem-se, com uma tendência decrescente com o aumento de cota, até valores insignificantes, ou nulos, para zonas de cota superior a 210 m na margem esquerda, e 230 m na margem direita. Excepção feita para o dreno DGP 43 que debitava um caudal de cerca de 1 l/min.

Os valores mais elevados, superiores a 1 l/min, registaram-se nos drenos DGP 3 (3,5 l/min), DGP 7 (4,8 l/min), DGP 283,5/A (3,5 l/min) e DGP 175,5/A (2,4 l/min).

- Nos drenos do plano de drenagem descendente da galeria de fundação (G145), dirigido para montante, os valores dos caudais medidos são relativamente baixos, só raramente excedendo, em muito pouco, 1 l/min. Distribuem-se irregularmente e são mais elevados na zona central, com progressivo decréscimo no sentido dos extremos da galeria. A sua continuidade é, porém, maior na zona da margem direita. Na zona

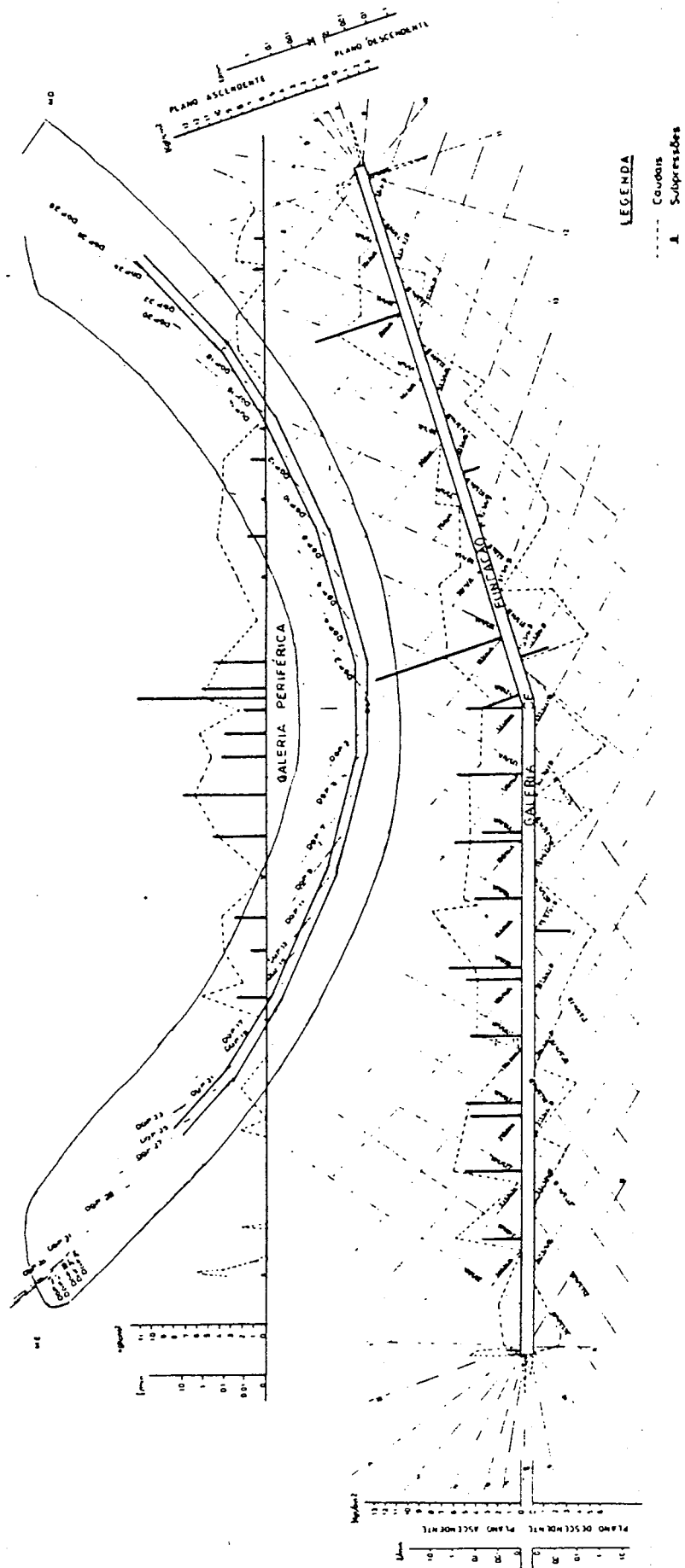


Fig. 24 - Subpressões e caudais medidos na rede de drenagem e na rede piezométrica em Novembro de 1985.



da margem esquerda nota-se uma tendência para valores mais elevados nos drenos designados por N/B, orientados para a margem esquerda, do que nos designados por S/B, orientados para a margem direita.

Os valores mais elevados, superiores a 1 l/min, registaram-se nos drenos 82,5/S/B (1,7 l/min), 112,5/S/B (1,1 l/min) e 127,5/N/B (1,4 l/min).

- Nos drenos do plano de drenagem ascendente da galeria de fundação, dirigido para jusante, para a base da barragem, os caudais medidos são também baixos, geralmente menores que 1 l/min, à excepção dos drenos 165/N/A e 30/N/A. Observa-se uma razoável continuidade de caudais ao longo da zona da galeria do lado da margem esquerda, que se prolonga um pouco até à zona do lado da margem direita (drenos nº 90), decrescendo, então, para voltar a subir na zona entre os drenos nº45 e 15. Do lado da margem esquerda nota-se uma aparente tendência para caudais mais elevados nos drenos definidos por S/A. A atitude destes drenos é próxima da dos N/B do plano descendente. Os valores mais elevados, superiores a 1 l/min, registaram-se nos drenos 30/N/A (1,2 l/min), 165/N/A (1,2 l/min) e 225/S/A (1,4 l/min).

Relativamente às subpressões observa-se o seguinte:

- Nos piezómetros e nos drenos da galeria periférica que foram momentaneamente instrumentados com manómetros, os valores mais elevados das subpressões registaram-se nos do fundo do vale, decrescendo rapidamente no sentido da margem direita e, de forma menos acentuada, mas progressiva, no sentido da margem esquerda.

A inclusão no gráfico da Fig. 24, conjuntamente, de subpressões medidas em piezómetros e drenos tem como objectivo a análise integrada da situação hidráulica da fundação em situações extremas de inexistência de drenagem. Os piezómetros mantem-se geralmente na posição de purga, portanto de pressão nula à boca, funcionando como simples drenos, sendo fechados somente 24 horas antes da realização da leitura das subpressões.

O valor mais elevado regista-se no piezómetro nº 1 do leque P4, na câmara superior, e é de 1,1 MPa, correspondendo a 80% da carga hidrostática. Lateralmente, passa-se rapidamente a

valores de percentagem de carga da ordem de 50% e inferiores. Os valores que se lhe seguem, por ordem decrescente, registaram-se no DGP7 (0,7 MPa - 53%), DGP2 (0,6 MPa - 40%), DGP9 (0,5 MPa - 35%) e DGP4 (0,5 MPa - 34%). Assim, o conjunto de valores mais elevados registam-se na zona de fundação entre a junta 2 e a junta 9, abaixo da cota 203 m, portanto, na zona do fundo do vale sobre a margem esquerda.

- Nos drenos da galeria de fundação à cota 145m, que foram instrumentados com manómetros, regista-se um facto curioso que é o de praticamente só se registarem subpressões nos do sector da fundação da margem esquerda e no plano ascendente, isto é, nos que se dirigem para jusante e para a base da barragem. Exceptuam-se o dreno 30/N/A (0,8 MPa), no plano ascendente do sector da margem direita, e os drenos do plano descendente 0/11/B (0,2 MPa), 67,5/N/B (0,1 MPa) e 112,5/S/B (0,2 MPa), no sector da margem direita, e 172,5/S/B (0,3 MPa), no sector da margem esquerda.

O valor registado mais elevado diz respeito ao dreno 105/N/A (1,2 MPa) do plano ascendente, localizado na zona correspondente ao centro do vale, e dirigido para a zona da fundação da barragem onde está instalado o piezómetro P4-1CS que registava também pressão elevada, conforme atrás referido. As subpressões registadas nos drenos do plano ascendente, a partir daquele dreno e no sentido da margem esquerda, apresentavam valores com uma certa regularidade e que oscilavam à volta dos 0,5 MPa, até próximo do extremo da galeria, reduzindo-se, então, para valores da ordem dos 0,1 MPa (262,5/3/A e 262,5/4/A), um pouco à semelhança do que se passava com os caudais drenados.

A variabilidade dos valores registados nesta zona não indicia qualquer diferenciação sistemática entre subpressões relativas a drenos com orientações diversas (N ou S), conforme, aparentemente, ocorria nos caudais drenados.

Nas Fig. 25 (margem direita) e 26 (margem esquerda) apresentam-se em perfis montante-jusante as cargas hidráulicas registadas nos leques piezométricos. Os valores registados correspondem às subpressões medidas nos piezómetros simples (furo total) e nas câmaras inferior e superior dos piezómetros duplos. Estes piezómetros permitem, com as suas duas câmaras, individualizar a medição

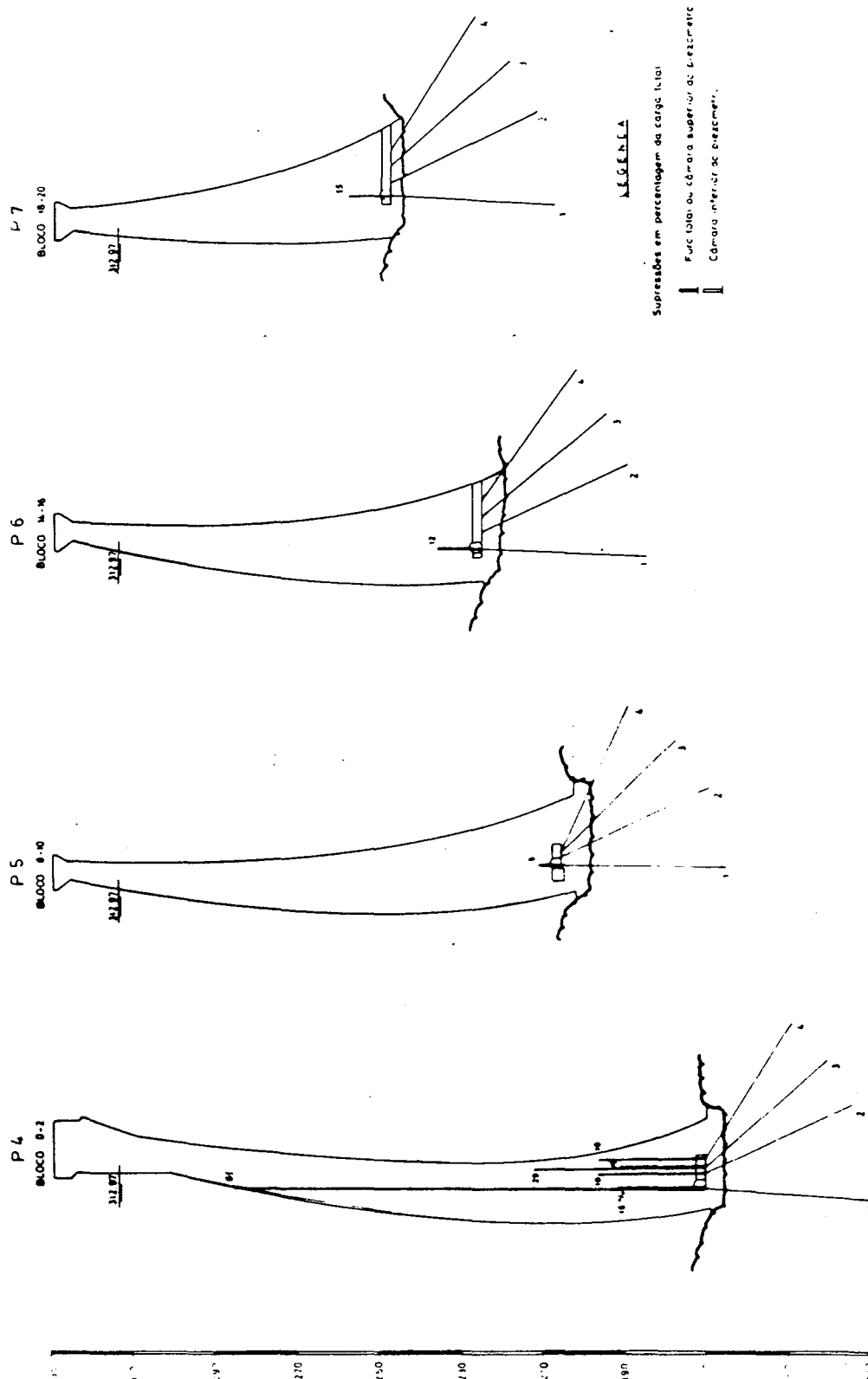


Fig. 25 - Subpressões medidas nos piezómetros da margem direita em Novembro de 1985.

da subpressão em zonas superficiais da fundação envolvendo o contacto betão-rocha, e mais profundas, envolvendo a zona de transição da zona tratada com injecções para a zona subjacente não tratada (LNEC 1979).

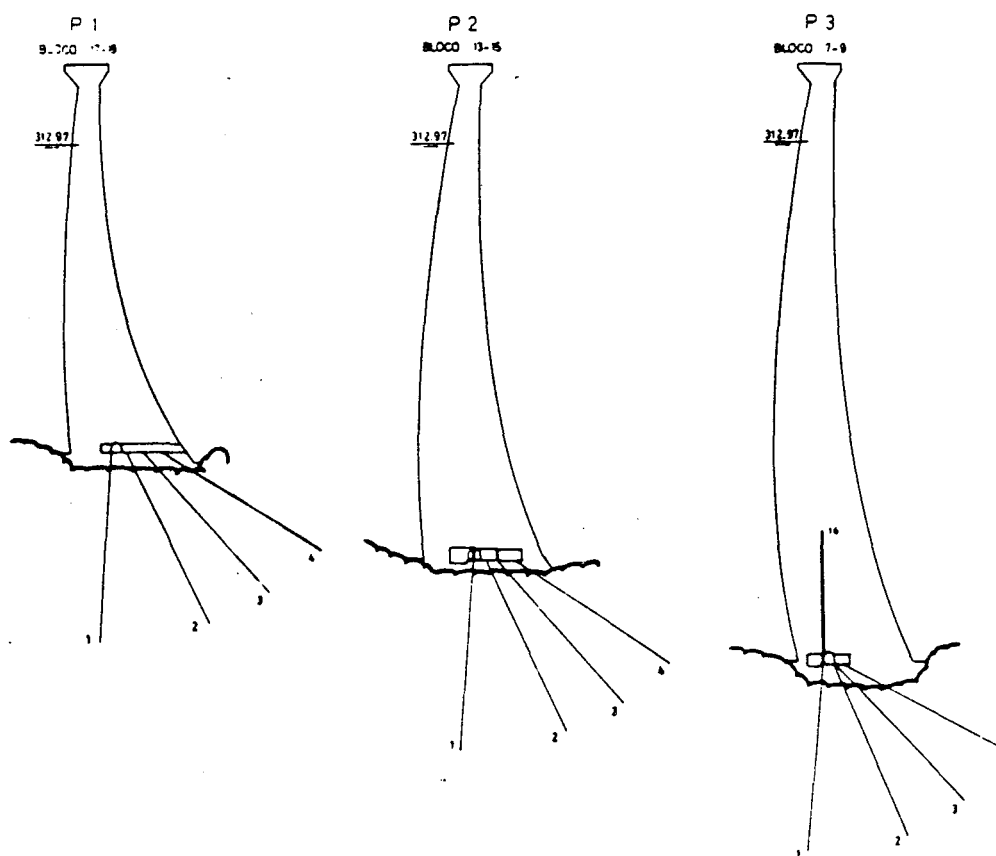


Fig. 26 - Subpressões medidas nos piezómetros da margem esquerda em Novembro de 1985.

A carga mais elevada regista-se, como atrás foi referido, na câmara superior do piezómetro P4-1, a que corresponde 80% da carga da albufeira. Como se pode observar, os valores registados nos restantes piezómetros do leque indicam uma diminuição acentuada da carga instalada em profundidade e no sentido de jusante, ocorrendo logo no plano da drenagem percentagem de carga da ordem de 18% (piezómetro 2), que sobe para cerca de 29% no piezómetro 3, para

voltar a baixar para 18% no piezómetro 4.

Nas câmaras inferiores dos piezómetros 1 e 3 a percentagem de carga instalada apresentava valores da ordem de 15%.

Nos restantes leques piezométricos, praticamente só nos piezómetros situados mais a montante, por vezes no plano de drenagem ou ligeiramente a montante desta, se registam subpressões. A carga mais elevada registou-se na câmara superior do piezómetro 1 do leque P3, na fundação do bloco 7-9, com valor da ordem de 26%.

Este é um aspecto que interessa salientar, na medida em que confere à rede de drenagem a garantia da eficiência do seu comportamento no alívio das subpressões. Esta asserção é válida também para o leque P4 no bloco 0-2, onde o decréscimo das subpressões no sentido de jusante confirma esse comportamento da drenagem. Neste caso, porém, deve ter-se em atenção o facto da existência da fossa a jusante (bacia de dissipação) e da influência da carga hidráulica por si instalada nos piezómetros de jusante do leque.

Visando a definição das zonas de fundação por onde se processa a percolação de fluxos mais importantes, efectuou-se um conjunto de ensaios em drenos da galeria periférica, situados na zona inferior do vale, que apresentam caudais susceptíveis de serem estabilizados e medidos em curto espaço de tempo.

O ensaio consistiu na introdução de um obturador simples no furo de drenagem que ia sendo posicionado sucessivamente a profundidades crescentes. Em cada posição era medido o caudal, que era conduzido à superfície através das varas de posicionamento, e a subpressão instalada no troço ensaiado quando se impedia o débito. Estes valores correspondiam aos caudais infiltrados e à subpressão no troço do furo inferior ao obturador.

A metodologia seguida permitiu avaliar, de forma expedita, as variações de caudal e de subpressão ao longo dos furos ensaiados e, assim, as zonas de maior drenancia na fundação.

Na Fig. 27 apresentam-se, sob forma gráfica, os resultados obtidos.

Embora o conjunto de drenos ensaiados não seja representativo de toda a rede de drenagem, e por isso não extrapoláveis para outras zonas da fundação os resultados obtidos, a conclusão geral que se pode tirar é a de que as maiores drenâncias se situam na zona da fundação entre o contacto e uma profundidade da ordem dos 10 me-

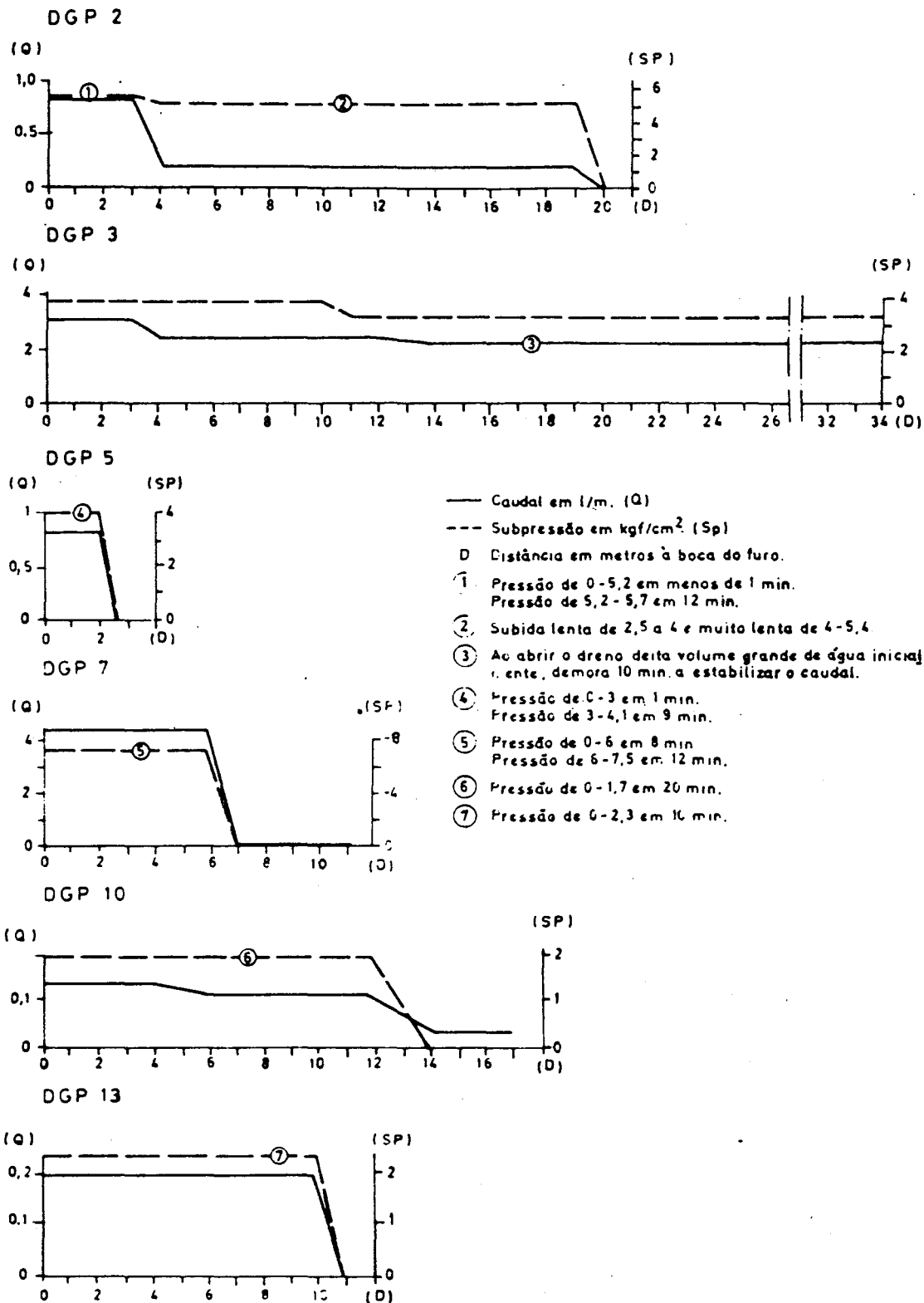


Fig. 27 - Resultados dos ensaios efectuados em drenos em Novembro de 1985.

tros. Exceptua-se o caso do dreno DGP3, cujo volume de água provem, em maior quantidade, de distância á boca superior a 34 metros.

Somente o dreno DGP2 não acumula grande volume de água quando fechado; os restantes acumulam quantidades relativamente elevadas, que não foram quantificadas. Os tempos de estabilização do caudal após abertura dos drenos é de cerca de 10 minutos nos drenos DGP3, DGP5 e DGP7 e de cerca de 1 minuto nos drenos DGP10 e DGP13.

Os drenos DGP2, DGP5 e DGP13 tinham depósitos de carbonato de cálcio no interior dos furos.

Tentou-se, ainda, ensaiar o dreno DGP12 e o piezómetro P4-4, não se tendo conseguido introduzir o obturador no primeiro e, no segundo, não foi possível retirar o tubo do manómetro sem o danificar. Pôde, no entanto, observar-se no dreno DGP12 que, abrindo o furo após algum tempo de obturação, saía água e ar emulsionado, por vezes com projecções devidas à compressão do ar, que se repetiam até à estabilização do caudal. Este aspecto apresenta características que o podem identificar com as situações de débito irregular observadas em outros drenos e piezómetros anteriormente referidos.

O estilo de aumento das pressões, após fecho dos manómetros, rapidamente até valores próximos da pressão máxima e, depois, lentamente até estabilizar, é indiciador de percolação através de fendas limpas, sem preenchimento de natureza friável, granular ou coesivo. Em defesa desta afirmação vem o facto de que, após os ensaios, os caudais drenados voltaram a valores idênticos aos anteriormente observados, portanto indicadores de funcionamento do maciço em regime elástico para o nível de pressões geradas, naturalmente pequeno.

#### 4.2.2.3 - Análise quantitativa de caudais drenados

i) Visando uma interpretação mais aprofundada do comportamento de alguns drenos e dos caudais parciais e totais drenados, realizaram-se análises quantitativas. O modelo estatístico utilizado, que permitiu avaliar as parcelas de caudal resultantes da variação da pressão hidrostática, da variação da temperatura e da sua evolução ao longo do tempo foi o seguinte:

$$Q = f(h) + f(\theta) + f(\tau) + K$$

com

$$f(h) = \sum_i^3 a_i h^i \quad ; f(\theta) = b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta; \text{ e } f(\tau) = \sum_i^3 c_i \tau^i,$$

sendo

$h = H - H_0$  a variação, em metros, da cota de água na albufeira;

$\theta = \frac{2\pi \cdot d}{365}$  o dia do ano em radianos;

$\tau$  = tempo, em dias, desde o início da série de resultados interpretada; e

$K$  = constante de adequação do modelo.

ii) Trata-se de um modelo simplificado que pode numa primeira análise interpretar de forma satisfatória o comportamento dos caudais medidos. Na base desta afirmação está a sua formulação que se pretendeu seguir uma justificação física dos fenómenos reguladores da percolação. A utilização de modelos deste tipo só deverá ser considerada se os domínios de variação da pressão hidrostática e da temperatura não induzirem comportamentos não sobreponíveis dos respectivos efeitos. É o caso, por exemplo, da variação de permeabilidade com o estado de tensão imposto ao maciço. Nesse caso ter-se-á que procurar uma formulação mais adequada a esse tipo de comportamento.

No caso de Cahora-Bassa, que estamos a considerar, as amplitudes de variação térmica anual são reduzidas (4.1.2) e o domínio de variação dos níveis no período analisado não é muito extenso (14 m), pelo que não são de admitir nas zonas da fundação de cota mais baixa variações significativas da permeabilidade associadas à variação do estado de tensão na fundação.

Basicamente, o caudal percolado é o resultado de um somatório de efeitos provocados pelas acções que maiores influências exercem, geralmente, sobre a percolação através da fundação: gradiente de subpressão, estado de tensão/deformação do maciço imposto pelo funcionamento da superestrutura e variações de temperatura (da água e do maciço). Não se considera no caso de Cahora-Bassa a acção hidroquímica por não se conhecer bem os seus efeitos ao longo do período em análise e também porque, como se verá adiante, deverem ser aprofundados os conceitos inerentes aos parâmetros a utilizar. Foi, no entanto, na óptica de detectar possíveis efeitos dessa acção que se efectuaram os referidos modelos. Pretendia-se verifi-



car da existencia, ou não, de parcela diferida nos caudais e tambem nas subpressões que pudesse relacionar-se com eventuais situações de alteração diferencial dos materiais da fundação indiciadas pelo estudo hidrogeológico.

Relativamente aos efeitos directos no caudal provocados pelas variações de pressão hidrostática podemos admitir que se geram relações de causa-efeito idênticas às que regulam a fenomenologia dos ensaios de injeção de água tipo Lugeon. Na Fig. 28 apresentam-se as relações mais comuns observadas neste tipo de ensaio (Louis 1974). Como se depreende, a relação entre o gradiente de pressão e o caudal injectado é suficientemente explicada através de um polinómio do terceiro ou quarto grau, consoante a abertura inicial das fracturas e o domínio das pressões, o qual por vezes atinge valores superiores a 0,5 MPa.

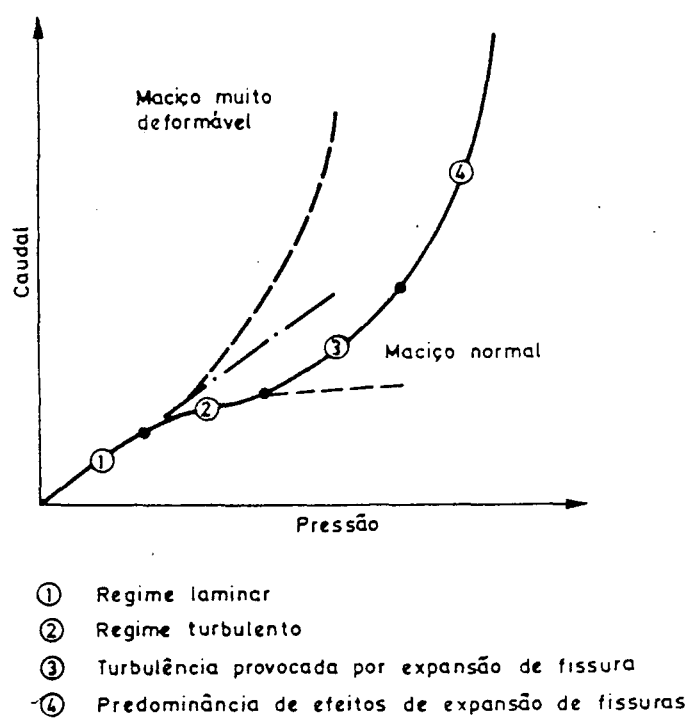


Fig. 28 - Relações entre a pressão de injeção e os caudais absorvidos em ensaios tipo Lugeon.

Esta hipótese de trabalho resulta do raciocínio que a seguir se explicita. Se considerarmos o escoamento sob pressão numa fractura de abertura inicial  $e_0$ , resultante por exemplo de um ensaio de injeção de água, teremos que, em regime laminar, o

caudal injectado será:

$$Q = K_l \cdot e^3 \cdot p \quad (\text{Sabarly, 1966})$$

e, se considerarmos  $\delta e$  a abertura provocada pelo aumento de pressão  $p$ , virá  $\delta e = \alpha \cdot p / E$ , em que  $E$  é o módulo de elasticidade da rocha e  $\alpha$  uma constante de proporcionalidade dependente do coeficiente de Poisson e do raio de influencia da variação de pressão de injeção aplicada; então,

$$Q = K_l \cdot p \cdot (e_0 + \alpha \cdot p / E)^3 \quad \text{ou} \quad Q = K_l \cdot \alpha^3 \cdot p^4 / E^3$$

se  $e_0$  for muito pequena.

Porém, para os níveis da subpressão observados na fundação, geralmente inferiores a 0,5 MPa, admite-se que um polinómio do terceiro grau para as variações da pressão hidrostática seja adequado. Idêntico ponto de vista podemos adoptar para a relação entre a pressão hidrostática e a água infiltrada no maciço de fundação, que é em certa medida a água de percolação e consequentemente o caudal drenado. Logo,  $Q_w = f(h) = \sum_1 a_1 h^1$ , em que  $a_1$  são os coeficientes a determinar e  $h$  representa a altura de água na albufeira em relação a uma cota de referência.

Quanto às variações de temperatura, e tendo presente as considerações feitas no Cap.2 (2.2.3), admite-se que os efeitos que produz nos vários agentes condicionadores do caudal (sobretudo na condutividade hidráulica) têm manifestação sazonal. Se atentarmos na Fig. 29, elaborada com base naquelas considerações, somos levados a concluir dessa forma. Na realidade, quer a viscosidade cinemática da água, quer o estado de compressão do maciço de fundação a montante (função da rotação da base da barragem, também comandada pela onda térmica anual) quer o estado de abertura das fracturas provocada pelas variações de temperatura experimentadas pelo maciço, têm uma evolução de carácter sazonal. As ondas correspondentes aos efeitos daí decorrentes apresentarão certamente amplitudes e fases diferentes, dependentes das propriedades dos materiais (coeficiente de dilatação linear, difusibilidade térmica, geometria da estrutura). Porém, o efeito global, somatório desses efeitos parcelares devidos às várias acções de natureza térmica, continua a ter carácter sazonal, conforme se pode verificar pela ilustração apresentada na Fig. 29.

Quer dizer então que, se não pretendermos separar estas parcelas, o efeito global de natureza térmica pode ser justificado pela clássica expressão (Gomes, 1981):

$$Q_e = b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta + b_3 \sin^2 \theta + b_4 \sin \theta \cdot \cos \theta$$

em que  $\theta$  é, como referido acima, o dia do ano convertido em radianos.

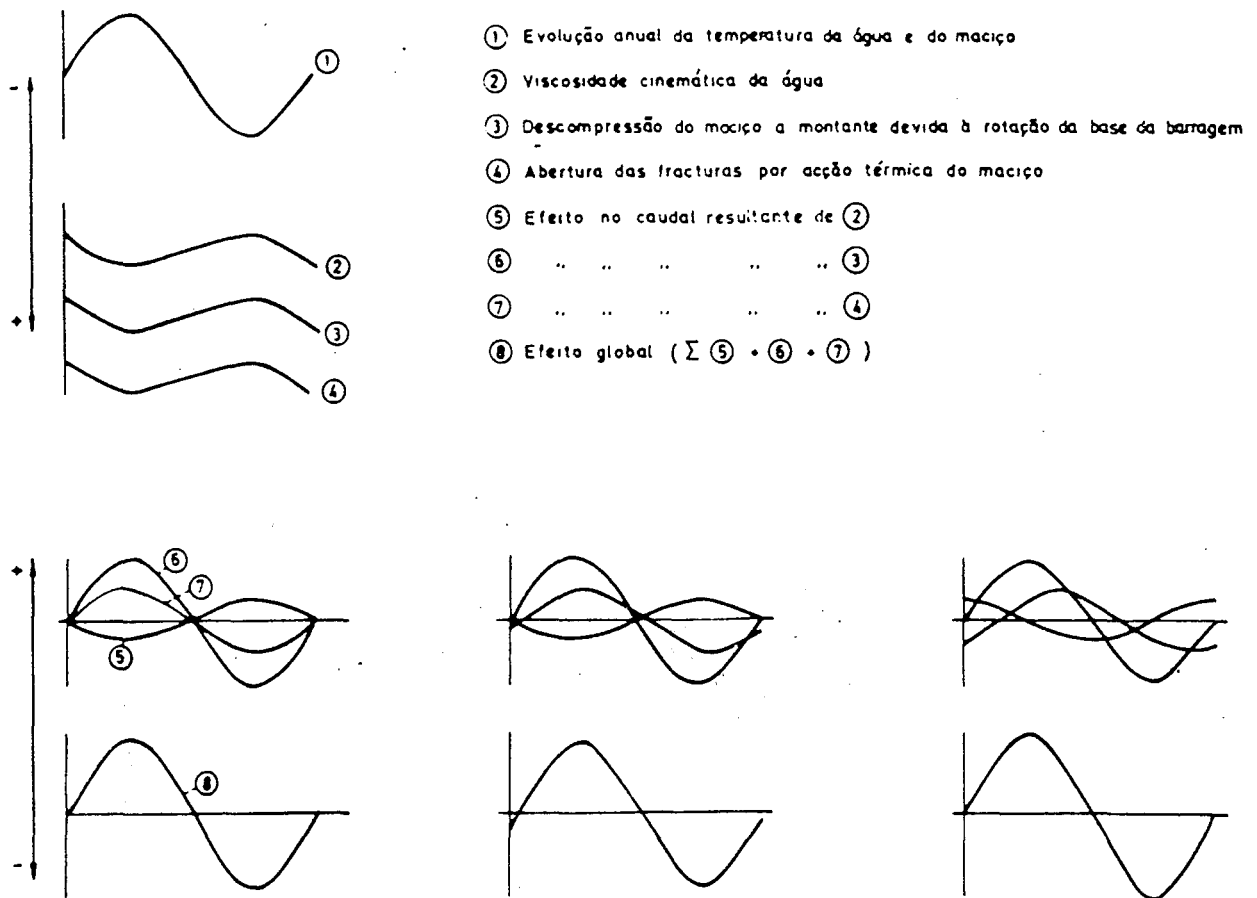


Fig. 29 - Relação entre acções térmicas e comportamento hidráulico da fundação.

Esta expressão pode tomar a forma simplificada:

$$Q_e = b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta$$

desde que o regime de exploração da albufeira e o clima da região apresentem uma certa regularidade anual (sazonalidade de período anual).

dos sobretudo pelas acções que alteram progressivamente a permeabilidade (alteração do estado de tensão, colmatação, erosão, fracturação, etc.), o uso de uma expressão polinomial daquele tipo pode justificar de forma global essa evolução. A definição de outro tipo de leis constitutivas do desenvolvimento dos vários fenómenos (que dão origem á alteração das características de permeabilidade da fundação ao longo do tempo) que condicionassem no modelo a separação dessa parcela tornariam essa análise mais potente e eventualmente com maior significado físico. Contudo, como se referiu, e para uma interpretação global e primária do caudal, a utilização criteriosa de uma expressão polinomial daquele tipo para o efeito do tempo conduz a resultados aparentemente coerentes e bastante aceitáveis.

iii) As séries de valores que serviram de base à calibração do modelo correspondem ao período de JAN 78 a DEZ 85.

Da anterior análise qualitativa dos caudais drenados pode tirar-se uma conclusão importante: a pequeníssima ou nula influência das variações de temperatura ao longo do ano no caudal percolado, quando a cota da albufeira funciona, normalmente, abaixo dos 320 m. Para níveis de água acima desta cota, praticamente, só o DGP43 parece acusar as variações anuais da temperatura, pelo que no caudal total drenado essa influência se mantém quase inexpressiva.

Normalmente, em estruturas deste tipo, as variações da temperatura influenciam os caudais mais por acção do funcionamento estrutural da barragem sobre a fundação do que pelas variações da temperatura induzidas na água, a qual, aliás, abaixo de determinada cota, deixa normalmente de sofrer influência significativa da variação da temperatura exterior.

O efeito global provocado nos caudais pelas variações de temperatura representa-se empiricamente nos gráficos da Fig. 29, já citada.

As curvas obtidas traduzem, assim, o somatório de efeitos resultantes da actuação de: i) alteração da permeabilidade resultante da variação do estado de tensão no maciço de fundação derivado da eventual rotação da base da barragem motivada pela variação do estado térmico da estrutura; ii) alteração da permeabilidade do maciço provocada pela variação da abertura das fracturas em função da modificação do estado térmico da matriz

rochosa; e iii) alteração da condutividade hidráulica das fracturas condutoras motivada pela modificação da viscosidade da água resultante da variação da sua temperatura.

Não se incluem neste conjunto as alterações provocadas pela rotação da base da barragem, devida á deformação da estrutura imposta pelas variações da altura da água a montante, por estarem íntimamente relacionadas com as variações da pressão hidrostática. Pretendeu-se, dessa forma, evitar possíveis correlações entre as variáveis associadas ás acções térmicas e ás variáveis associadas ás acções da pressão hidrostática.

Passemos, então, á análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo no que respeita á parcela devida ao conjunto daquelas acções de natureza térmica.

Como se pode deduzir da curva anual da temperatura ambiente do ar ao nível do coroamento (Fig. 30, gráfico A) e das curvas da temperatura da água próximo do fundo, as variações de temperatura da água acusam um decréscimo com a profundidade e um atraso de fase, consequência da inércia térmica da massa líquida. Embora os termómetros fixos ao paramento de montante, e destinados à medição da temperatura da água, não garantam esses valores com absoluto rigor, permitem conhecer o estado térmico da massa líquida na fronteira com uma aproximação razoável.

Verifica-se, como já foi referido em 4.1.2, que a temperatura da água próximo do fundo (água de infiltração) acusa muito pequenas variações ao longo do ano. Tais amplitudes de variação ( $<4^{\circ}\text{C}$ ), tendo em consideração os gráficos das Figs. 6 e 7, conduzem á conclusão de que as correspondentes modificações, quer do estado de abertura das fracturas quer da viscosidade da água, são de reduzida importância e pouco significativas na alteração do valor do caudal, em particular no drenado pela fundação a cotas mais baixas.

Resta, por esse motivo, a influência da variação do estado de tensão na fundação, eventualmente associado à rotação da base da barragem.

Na Fig. 31 apresentam-se as curvas do efeito da temperatura obtidas através da interpretação quantitativa dos deslocamentos pendulares medidos na consola central entre 1975 e 1978. Admitindo que as superfícies se mantêm planas, as deformadas correspondentes da parcela de deslocamento horizontal devida à acção das variações de temperatura indiciam uma ligeira rotação da base da barragem.

Apesar de muito pequena, pode originar a descompressão no maciço suficiente para provocar a também pequena alteração da sua permea-

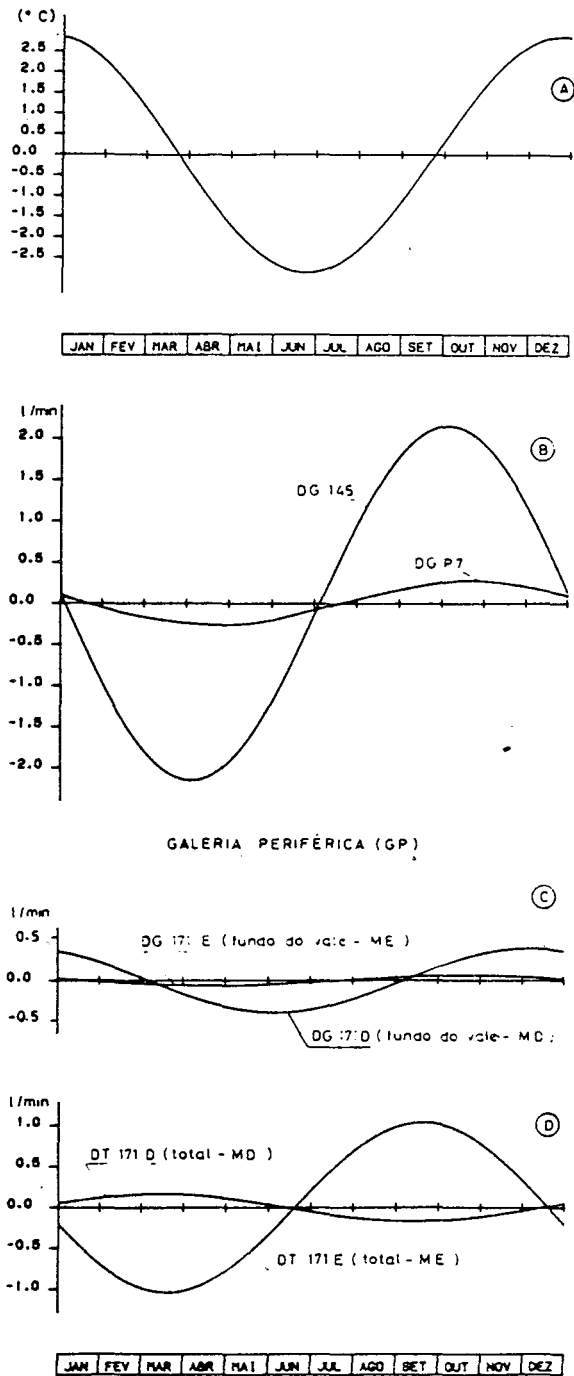


Fig. 30 - Curvas de influência das variações de temperatura no comportamento dos caudais ao longo do ano.

bilidade, em especial nas zonas vizinhas da base da barragem. Esta

afirmação encontra suporte tanto nos resultados dos ensaios efectuados em 1985 (alínea 4.2.2.2; Fig. 27) como na análise dos resultados de observação piezométrica adiante referida.

Voltando de novo á Fig. 30, no gráfico B podem observar-se as curvas do dreno DGP7 da galeria periférica, sob o bloco 1-3, e do caudal total medido na fundação da barragem (galeria periférica + galeria de fundação G145).

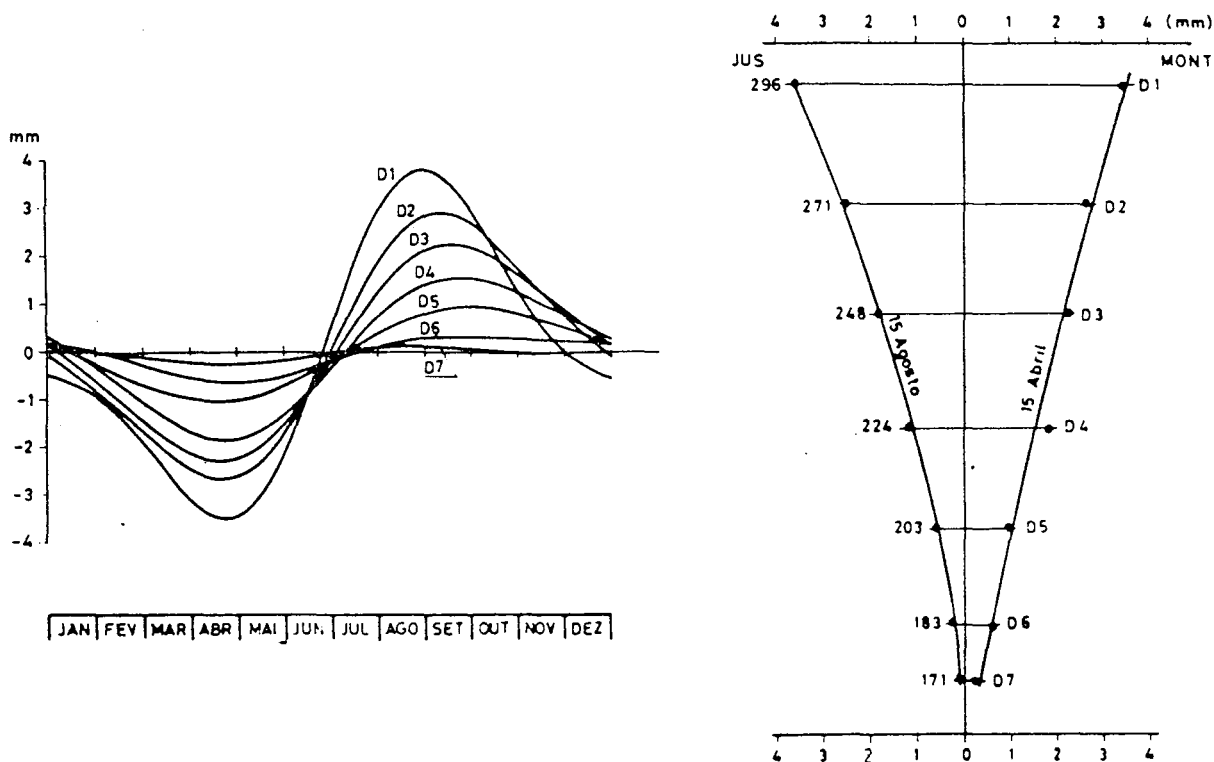


Fig. 31 - Curvas de influência das variações de temperatura nos deslocamentos horizontais da consola central.

Constata-se que na época em que a estrutura se apresenta mais quente (Março-Abril; Fig. 19), ocorrem também as maiores diminuições de caudais devidas à acção térmica.

Nos gráficos C e D apresentam-se as curvas referentes aos caudais totais medidos ao longo das duas margens na galeria periférica (gráfico D) (DTMD e DTME) e no fundo do vale (gráfico C), também na galeria periférica, (DG171D e DG171E). Como se pode observar, as variações são pequenas e as fases das respectivas LNEC-Proc. 43/13/9208

ondas apresentam alguma diversidade, o que é natural, dado que englobam caudais da rede de drenagem, da rede piezométrica e das infiltrações através do betão, cujas localizações variam desde muito próximo da cortina de impermeabilização a montante (zona de compressão em época quente) até ao pé de jusante (zona de des-compressão em época quente).

Nas Figs. 32 e 33 apresentam-se, respectivamente, os gráficos correspondentes às parcelas de caudal devidas à influência da pressão hidrostática e do efeito de tempo; dizem respeito ao dreno

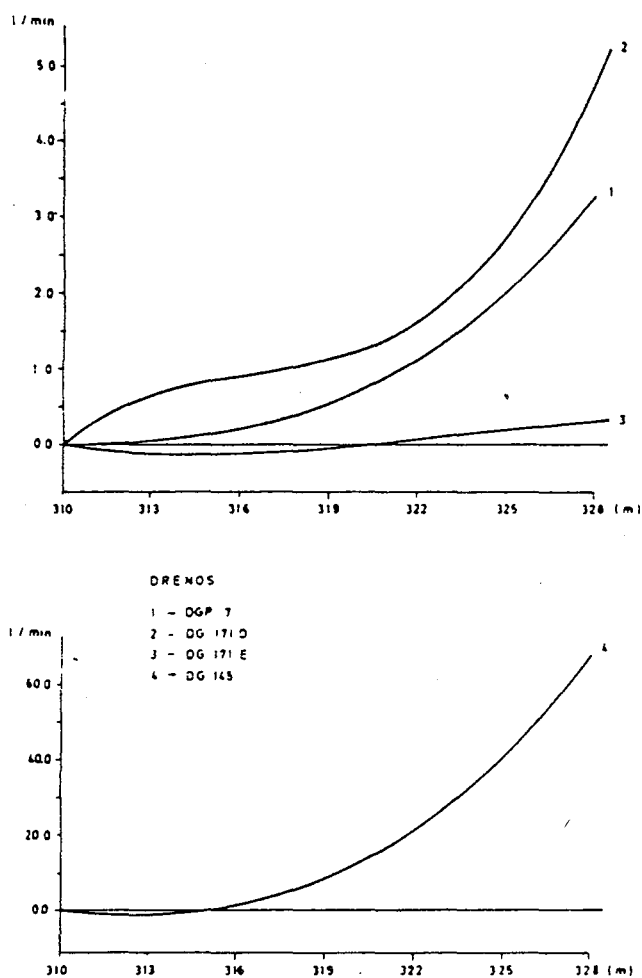


Fig. 32 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais drenados.

DGP7, aos caudais parciais medidos no troço horizontal da galeria periférica à cota 171 m, correspondendo, grosso modo, o DG171D ao bloco 0-2 e o DG171E ao bloco 0-1, e ao caudal total drenado na fundação da barragem e medido à entrada do poço de bombagem



(DG145).

Com excepção do caudal DG171E, de reduzido valor, todos os restantes reflectem uma marcada influência da pressão hidrostática, que se começa a fazer sentir mais acentuadamente para níveis superiores à cota 316 m no DGP7 e DG145 e para níveis superiores a 320 m no DG171D.

A variação do nível da água na albufeira entre as cotas 316 m e 326 m corresponde uma variação de caudal total drenado de 60 l/min.

A evolução dos caudais totais drenados (DG145) ao longo do período em análise, cujos gráficos se apresentam na Fig. 33, aponta para um decréscimo significativo do caudal total (DG145) da ordem de 50% entre 1980 e 1985.

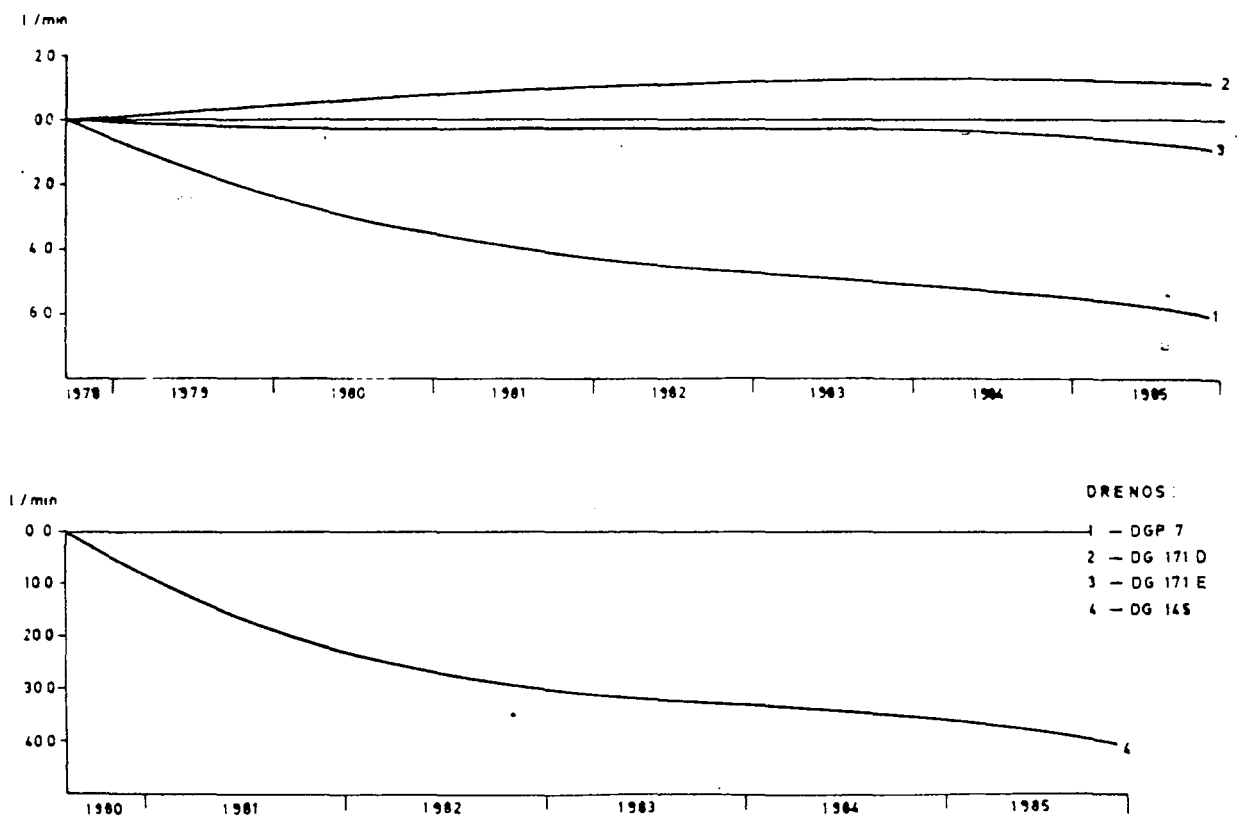


Fig. 33 - Curvas do efeito do tempo nos caudais drenados.

Se se comparar naquele período esta curva calculada da influência do tempo com a do diagrama do caudal observado apresen-

tada na Fig. 23, verifica-se uma elevada concordância de estilo entre elas.

Este facto permite, só por si, considerar aceitável a parcela devida ao efeito do tempo da separação de efeitos efectuada e o modelo utilizado com adequado sentido físico do fenómeno. O DGP7 apresenta também diminuição acentuada, entre 1978 e 1985, ligeiramente superior a 50%. Os caudais do DG171D e do DG171E não apresentam evolução significativa; há um ligeiro acréscimo do caudal do DG171D até 1983, com posterior tendência para decréscimo pouco significativo; essa mesma tendência para decréscimo está patente no DG171E a partir, também, de 1983.

Na Fig. 34 estão representadas as curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais parciais medidos na galeria periférica a várias cotas, do lado da margem direita e do lado da margem esquerda. Os números 1 a 5 dizem respeito aos colectores do

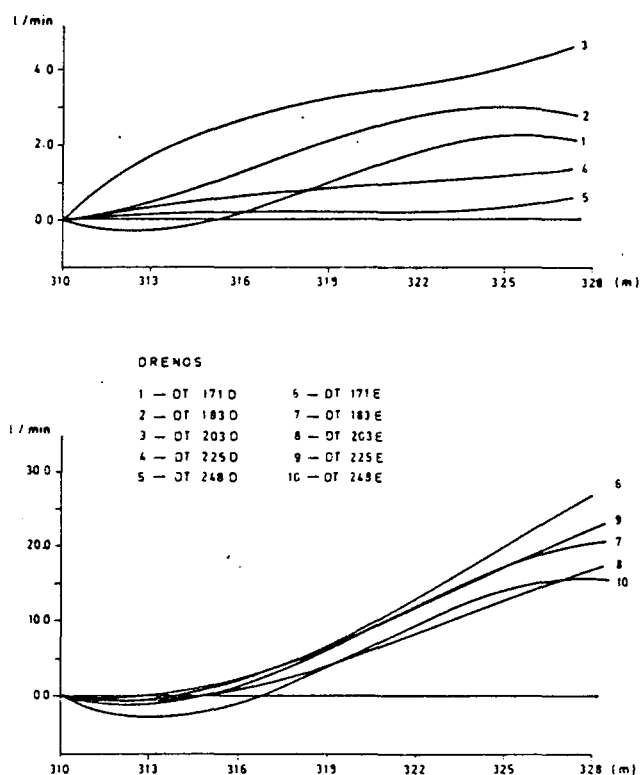


Fig. 34 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais parciais medidos na galeria periférica.

lado da margem direita e os números 6 a 10 aos colectores do lado da margem esquerda. O caudal correspondente ao número de ordem mais

baixo do colector integra os caudais correspondentes aos colectores de números de ordem superior.

A primeira evidência a referir é a de que os caudais drenados pela fundação do lado da margem esquerda são mais elevados que os drenados pelo lado da margem direita.

O estilo da resposta dos caudais à subida da água na albufeira é também distinta nas duas margens para os drenos cujas bocas se situam a cotas superiores a 203 m; para os situados a cotas inferiores, as curvas de influência aproximam-se, nas duas margens, da homotetia.

O aumento da carga hidrostática provoca, na margem direita, maior influência no caudal de drenos cujas bocas se situam entre as cotas 203 e 225 m, enquanto na margem esquerda essa maior influência se verifica em drenos cujas bocas se situam entre as cotas 171 e 203 m. Na margem direita essa influência decresce com a cota da rede de drenagem. Na margem esquerda a influência da pressão hidrostática diminui na rede de drenagem situada entre a cota 225 e 183 m, para voltar a subir para cotas inferiores.

Enquanto na margem esquerda a subida da cota da água na albufeira começa a ter influência no aumento dos caudais a partir dos 316 m, na margem direita essa influência começa a fazer-se sentir a partir de cotas mais baixas, considerando o domínio de variação dos níveis analisado superior á cota 310 m.

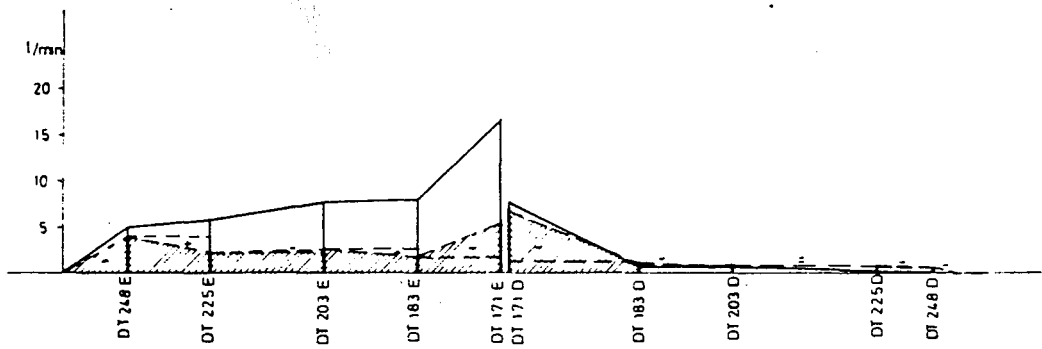
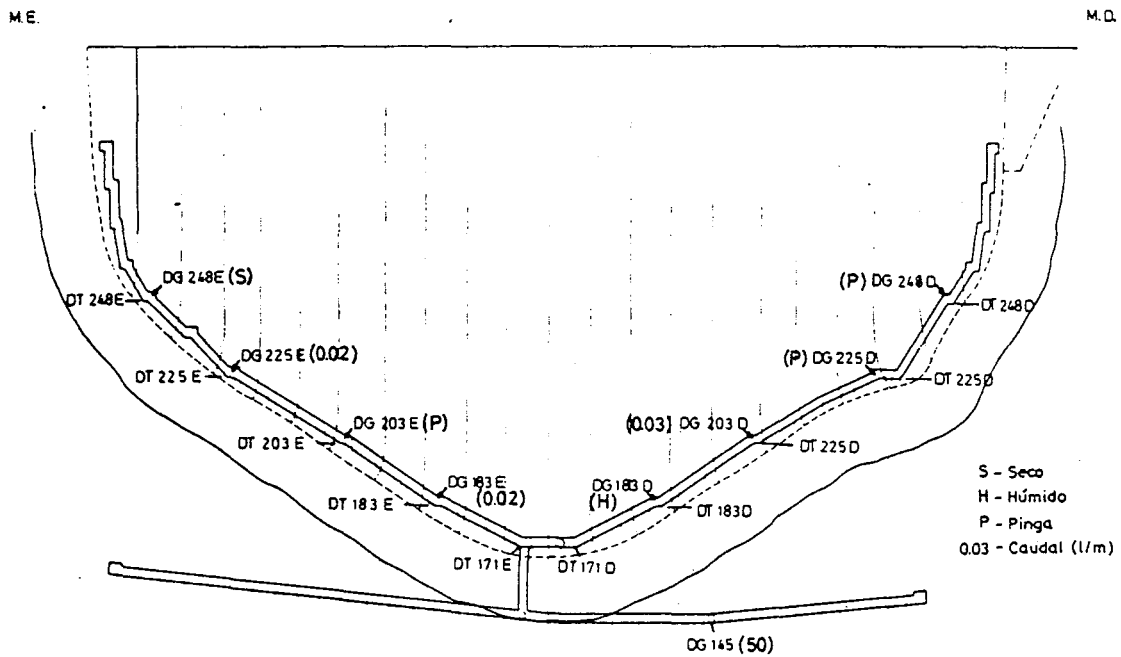
iv) Na Fig. 35 indicam-se os locais de medição dos colectores de caudais parciais existentes ao longo da galeria periférica e de fundação.

Os colectores da galeria periférica designados por DG medem os caudais infiltrados no betão e juntas da barragem afluentes às galerias horizontais; os designados por DT medem os caudais totais infiltrados na fundação, no betão e nas juntas da base da barragem, afluentes à galeria periférica, e incluem também o já medido nos DG. Os DT de cota mais baixa integram os caudais medidos nos DT de cota superior.

Na galeria de fundação o DG 145 mede o caudal total drenado pela rede de drenagem da galeria periférica e da galeria de fundação e, também, as ressurgências ocorrentes no betão e nas juntas das galerias da barragem.

Na mesma figura (alçado superior) discriminam-se os caudais

medidos nos DG, e no perfil, em baixo, os caudais medidos nos DT em 85-11-15 e, ainda, a evolução dos caudais medidos nos DT entre 1980 e 1985 (parcela correspondente ao efeito de tempo).



- - Total acumulado
- ⌊ - Valor das parcelas do caudal total acumulado devidos ao efeito de tempo, entre Janeiro 80 e Dezembro 85.
- (-) - Diminuição do caudal parcial
- (+) - Aumento do caudal parcial

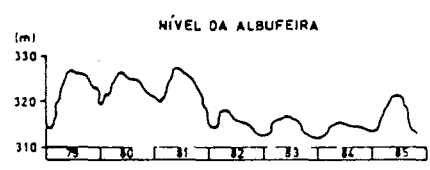


Fig. 35 - Caudais parciais medidos na galeria periférica em Novembro de 1985.

Como se pode verificar, os caudais medidos nos DG são bastante pequenos, mesmo tendo em atenção a possível evaporação ao longo do percurso, e portanto sem significado nos volumes parciais ou no total drenado.

Relativamente aos caudais medidos nos DT, a rede de drenagem da margem esquerda é a responsável pelo maior volume afluente. Nesta margem as maiores contribuições provêm das zonas da fundação situadas acima da cota 248 m e da zona de fundação situada abaixo da cota 183 m.

Na margem direita, acima da cota 183 m, o volume de água drenada é muito baixo, ficando a maior contribuição a dever-se à zona abaixo daquela cota.

Do mesmo gráfico consta, como já referido, a evolução das parcelas de caudal medidos nos DT devidos ao efeito do tempo entre 1980 e 1985.

Verifica-se que na margem direita essas parcelas são da ordem de grandeza dos caudais respectivos medidos em 85.11.15, sendo até nas cotas mais elevadas ligeiramente superiores. Na margem esquerda ocorre também situação semelhante para o caudal total medido acima da cota 248 m.

Na generalidade, os valores mais elevados da parcela de caudal devida ao tempo correspondem a diminuição do caudal entre 1980 e 1985.

As diminuições mais significativas ocorreram nos caudais drenados acima da cota 248 m e abaixo da cota 183 m, na margem direita.

Os aumentos, relativamente reduzidos, ocorreram na margem esquerda em drenos cujas bocas se localizam entre as cotas 248 e 225 m e entre as cotas 203 e 183 m.

Se tivermos em linha de conta a evolução do nível da água na albufeira, percebe-se que o decréscimo registado nos caudais se deve sobretudo a essa situação, em especial nos drenados pelas zonas da fundação acima da cota 248 m.

#### 4.2.3 - Subpressões

##### 4.2.3.1 - Análise qualitativa das subpressões medidas na rede piezométrica

Nas Fig. 11 e 12 indicam-se, em alçado e planta, respectivamente, as localizações dos leques de piezómetros P1 a P7 que constituem a rede piezométrica instalada na fundação da barragem, e cujos manómetros se situam na galeria periférica.

Nos gráficos das Fig. 36 a 40 representa-se a evolução do nível da albufeira e das cargas hidrostáticas registadas nos piezómetros entre 1979 e 1985, tendo-se feito corresponder estas à altura de água, em metros, acima do local de leitura do manómetro respectivo. A sua apresentação, em termos de cotas, facilita a

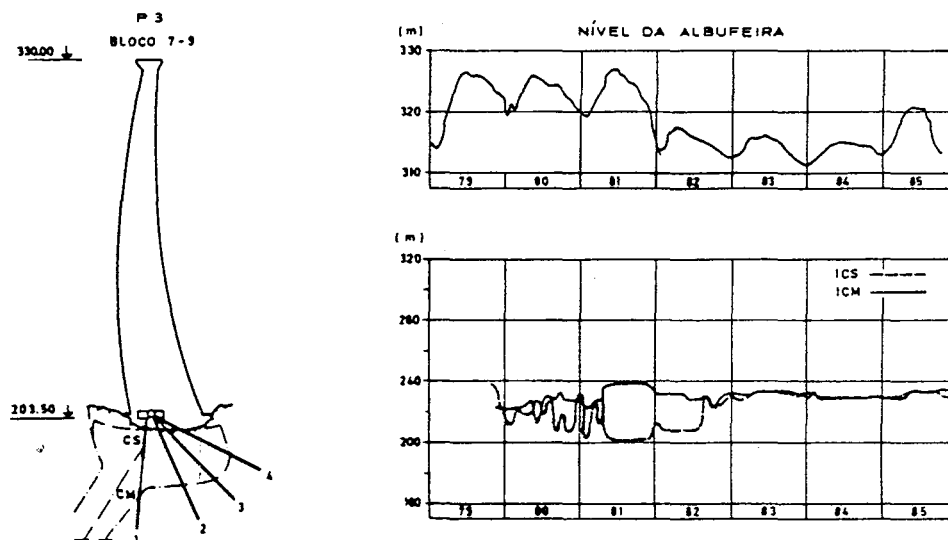


Fig. 36 - Subpressões observadas no leque piezométrico P3.

análise, devido à fácil transformação em percentagem de carga instalada, relativamente à altura de água na albufeira.

Como se pode observar, somente em piezómetros dos leques P3 a P7 se registaram valores cuja continuidade os torna interessante analisar.

No leque P3 (Fig. 36), situado na fundação do bloco 9-11, as câmaras piezométricas média e superior do piezómetro nº1 têm registado valores que, exceptuando as oscilações verificadas no período de 1980, 1981 e 1982, se têm mantido praticamente constantes. Aparentemente, não reflectem sensibilidade significativa à variação da cota da água na albufeira. Quer isto significar que a percentagem de carga instalada varia na razão inversa da cota de água na albufeira.

A câmara superior apresenta até 1982 um comportamento esqui-

sito, tendo-se registado em 1981-1982 uma diminuição da subpressão quando o nível da albufeira registou a sua maior subida. Posteriormente, com a descida do nível, verificou-se uma subida da subpressão.

O leque P4 (Fig. 37), situado na fundação do bloco 0-2, é o único em que todas as câmaras piezométricas têm registado subpressão. Como se pode observar, os valores mais elevados correspondem às câmaras piezométricas superiores dos piezómetros n.os 1 e 3 (P4-1CS e P4-3CS), que se localizam na zona de transição betão-rocha.

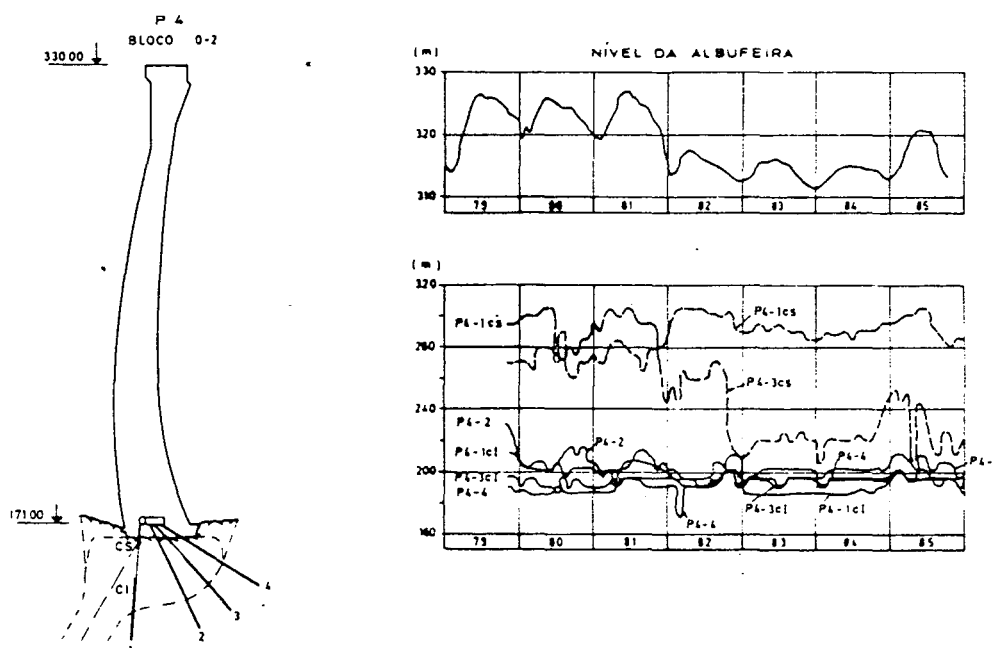


Fig. 37 - Subpressões observadas no leque piezométrico P4.

Em P4-1CS nota-se uma evolução de certa forma irregular, observando-se um abaixamento significativo da subpressão entre 1981 e 1982 e entre 1982 e 1983, com ligeira subida em fins de 1984 e princípios de 1985. É notória a relação entre a variação da cota da

albufeira e a subpressão registada; parece, no entanto, haver também alguma relação com a cota da água a jusante, relação essa que não é fácil de estabelecer por não dispormos dos elementos referentes às descargas e aos caudais turbinados. Após 1982, a percentagem de carga instalada oscila entre os 40 e 50%, depois de, em 1981, ter atingido valores da ordem de 75%.

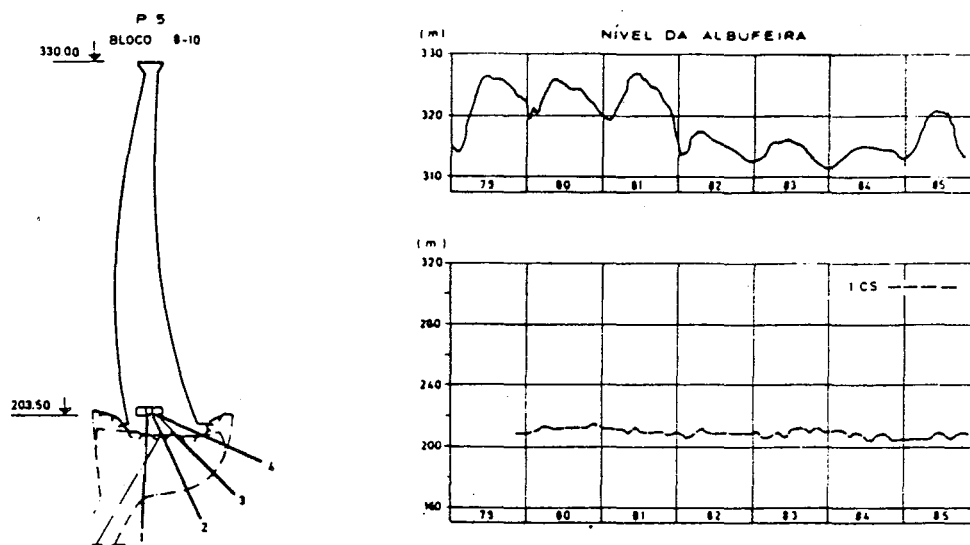


Fig. 38 - Subpressões observadas no leque piezométrico P5.

Dos restantes piezómetros do leque, sómente o P4-1CI e o P4-2 evidenciam alguma, reduzida, sensibilidade às variações da pressão hidrostática. Tanto o P4-1CI como o P4-2, o P4-3CI e o P4-4 têm registado percentagens de carga, em relação à cota da água na albufeira, de pequena variação e que se situam à volta dos 20%.

Constata-se, desta forma, uma redução significativa da carga instalada ao nível da rede de drenagem.

Com efeito, é através da rede de drenagem, a qual se situa entre os piezómetros n.ºs 1 e 2 do leque, que se obtém uma diminuição da carga instalada da ordem dos 75%.



No leque P5 (Fig. 38), situado na fundação dos blocos 10 - 12 e 12-14, somente a câmara superior do piezómetro nº 1 tem registado subpressão de valor bastante reduzido e pouco sensível às variações da pressão hidrostática.

O mesmo se pode dizer do leque P6 (Fig. 39), situado na fundação do bloco 16 - 18, no qual somente a câmara superior do piezómetro nº1 tem registado subpressão. Os valores observados são baixos, não ultrapassando, em geral, os 20%. A evolução parece sugerir que em 1983 e período seguinte se deu uma ligeira subida da subpressão. Tal facto pode ficar a dever-se a eventuais operações de manutenção do equipamento.

No leque P7 (Fig. 40), situado na fundação do bloco 20 - 22, também só a câmara superior do piezómetro nº 1 tem acusado regularmente subpressão. Parece ocorrer uma situação semelhante à verificada no P6-1CS, atrás descrita, em que se registou uma diminuição da carga instalada entre 1980 e 1982, subindo de novo em 1982 para depois descer ligeiramente e manter-se posteriormente. Os valores máximos de percentagem de carga observados registaram-se em 1982 e foram da ordem dos 33%. Aparentemente, o seu comportamento não evidencia sensibilidade às variações da pressão hidrostática.

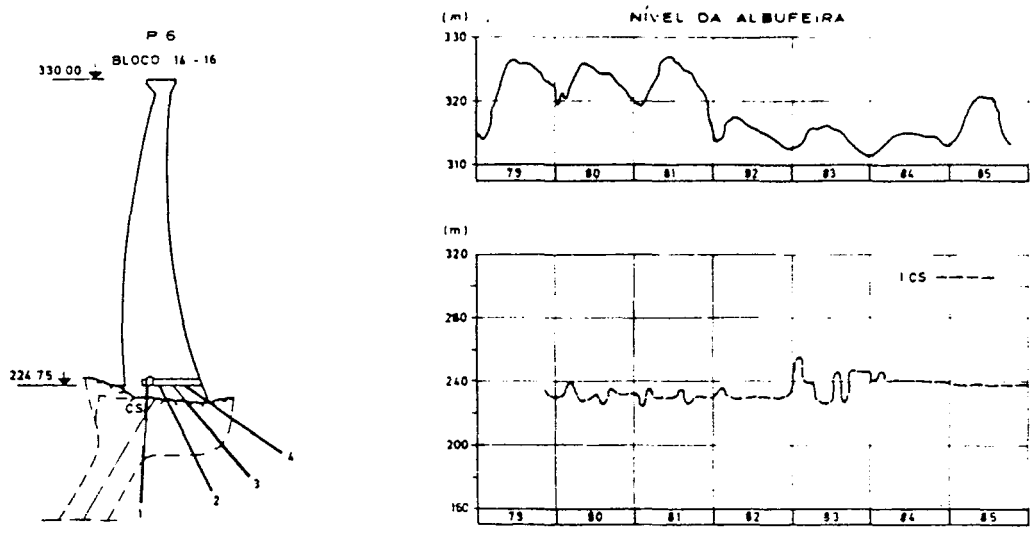


Fig. 39 - Subpressões observadas no leque piezométrico P6.

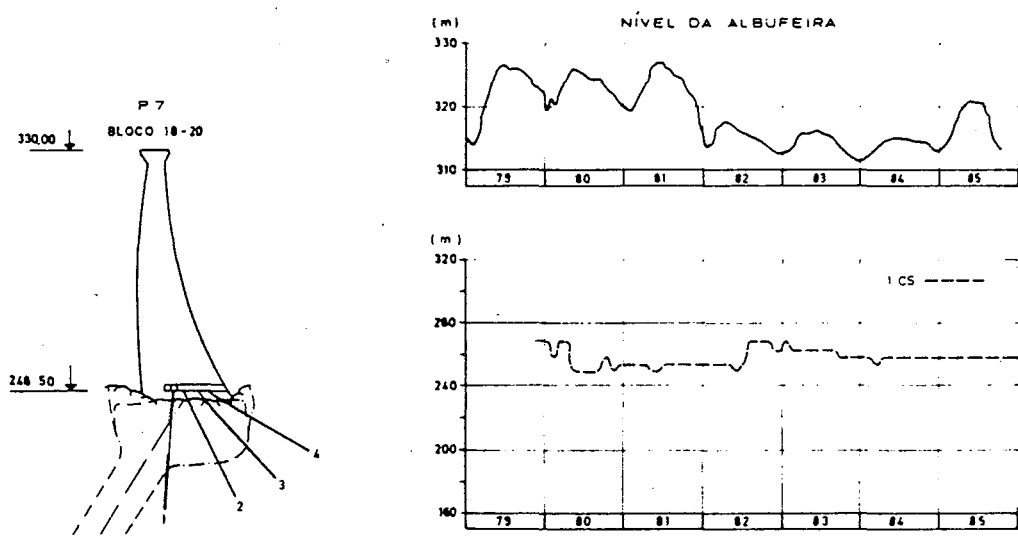


Fig. 40 - Subpressões observadas no leque piezométrico P7.

4.2.3.2 - Ensaios efectuados com piezómetros em 1985

Em 85.11.12, precedendo os ensaios efectuados no dreno DGP2 (alínea 4.2.2.2), efectuou-se um ensaio visando determinar a eventual interferência entre este dreno, o leque de piezómetros P4 e o dreno DGP4.

O ensaio consistiu na medição do caudal naqueles furos antes e após tamponar o dreno DGP2. Os valores medidos foram os seguintes:

	<u>antes</u>	(l/min)	<u>após</u>
DGP4	0,27	.....	0,27
P4-1CS	1,95	.....	2,03
P4-3CI	2,24	.....	2,24
P4-3CS	0,23	.....	0,36
P4-2	0,13	.....	0,14
P4-4	1,70	.....	1,70

Seguidamente, instalou-se um manómetro no dreno DGP2, tendo-se registado, ao fim de 12 minutos, a pressão de 0,62 MPa, praticamente estabilizada. Fechou-se, então, o piezómetro P4-1CS, o qual atingiu quase instantaneamente os 1,08 MPa, podendo observar-se que o DGP2 subiu dos 0,62 aos 0,83 MPa, quase instantaneamente, tendo em seguida o obturador cedido. Abertos os dois furos, ambos recuperaram imediatamente o caudal anterior.

Os valores da subpressão então registados no leque P4 foram os seguintes:

P4-1CS: 1,13 MPa  
P4-1CI: 0,19 "  
P4-2 : 0,27 "  
P4-3CS: 0,49 "  
P4-3CI: 0,20 "

Seguidamente, abriram-se, de novo, todos os piezómetros do leque, começando pelo piezómetro P4-1CS, por ser o que registava maior pressão. Os valores registados nos restantes, passados 10 minutos, após a abertura do P4-1CS, foram os seguintes:

P4-1CI: 0,18 MPa  
P4-2 : 0,25 "  
P4-3CS: 0,34 "  
P4-3CI: 0,20 "  
DGP4 : 0,57 "

Passados mais 10 minutos, o DGP4 tinha uma pressão de 0,5 MPa e os outros mantinham a mesma pressão.

Abriram-se, finalmente, os restantes e pode verificar-se que todos recuperaram quase instantaneamente o caudal normal, tendo acumulado, portanto, diminutos volumes de água em relação ao início do ensaio.

Em 85.11.15 colocou-se um manómetro no dreno DGP4.

Com o leque de piezómetros P4 aberto, portanto sem a subpressão instalada, verificou-se que:

- o dreno DGP4 apresentava uma pressão de 0,47 MPa;
- os drenos DGP1 e DGP3 debitavam 0,02 l/min e 2,42 l/min, respectivamente.

Fechado o leque P4, registaram-se, passadas 24 horas, os seguintes valores:

- o dreno DGP4 apresentava uma pressão de 0,71 MPa tendo demorado 1 minuto para elevar a pressão de 0 a 0,54 MPa;
- os drenos DGP1 e DGP3 debitavam 0,03 l/min e 2,68 l/min, respectivamente.

A realização destes ensaios permitiu verificar a possível

interligação da rede de fracturas do maciço de fundação, na zona do fundo do vale, quando instalada a subpressão motivada pelo fecho dos piezómetros do leque P4, em particular do piezómetro P4-1CS, ou pela obturação de alguns drenos. Essa migração dos fluxos percolantes observa-se, predominantemente, na zona do maciço imediatamente abaixo do contacto.

#### 4.2.3.3 - Análise quantitativa de caudais e subpressões medidos em piezómetros

i) Na tentativa de explicar em que termos se processa a influência das acções na evolução dos caudais debitados por alguns piezómetros e nas respectivas subpressões, elaboraram-se, tal como se fizera para os drenos, análises quantitativas. No modelo estatístico utilizado fez-se uso da expressão matemática já descrita em 4.2.2.3 e cuja fundamentação e formulação foram aí explicitadas.

Fez-se esta análise para alguns piezómetros constituintes dos leques da rede piezométrica e também para drenos que estão instrumentados com manómetro, os quais, por isso, são também considerados como piezómetros. Enquanto que os primeiros se encontram colocados a partir da galeria periférica, os segundos encontram-se colocados na galeria de fundação (G145). As suas localizações indicam-se nas figuras 11, 12 e 13.

Nas Fig. 41 e 42 apresentam-se as curvas de influência das variações de temperatura; nas Fig. 43 a 45 apresentam-se as linhas de influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões observadas; na Fig. 46 representa-se, de forma sintética, a influência da pressão hidrostática e da temperatura naquelas mesmas grandezas; e, nas Fig. 47 a 48, representa-se o efeito do tempo.

ii) Na Fig. 41 representam-se as curvas de influência das variações de temperatura nos caudais debitados pelos piezómetros do leque P4, quando abertos, e nas pressões registadas nesses piezómetros e nos do leque P3, ambos colocados na galeria periférica.

Relativamente ao caudal, cujas parcelas devidas à acção térmica são pequenas, verifica-se que as maiores variações ocorrem nos piezómetros situados mais próximo de montante e nas câmaras existentes na faixa de maciço imediatamente abaixo da base da barragem (P4-1CS e P4-3CS). Nestes, as diminuições de caudal ocorrem também na época quente, tal como se observou com os caudais debitados

pelos drenos.

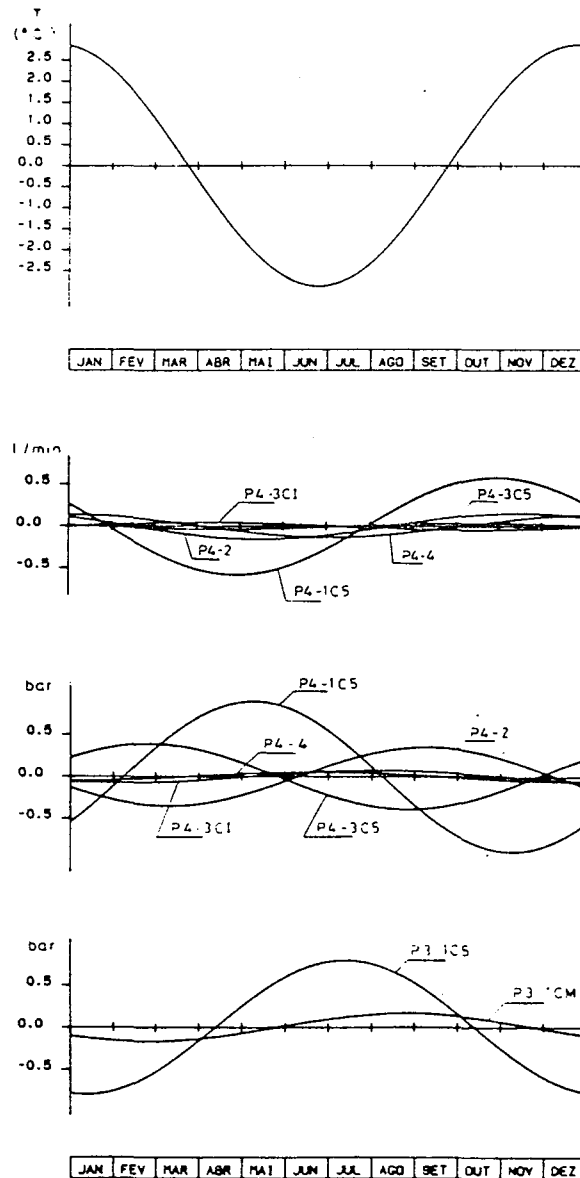


Fig. 41 - Curvas de influência da temperatura nos caudais e subpressões medidos em piezómetros da galeria periférica.

Quanto às subpressões, nas câmaras superiores dos piezómetros do leque 4 (P4-1CS e P4-3CS), na época quente observa-se aumento da parcela devido às variações de temperatura, enquanto nas restantes (P4-2, P4-3CI e P4-4) se passa o contrário, embora com valores

insignificantes.

Nos piezómetros do leque 3 verifica-se que as variações da parcela da subpressão devida às variações térmicas são mais elevadas na câmara superior do que na câmara inferior. Existe uma diferença de fase entre as respectivas ondas de cerca de mês e meio, observando-se a diminuição da subpressão na época quente.

Constata-se, desta forma, uma certa diversidade de resposta hidráulica do maciço às variações de temperatura, quer em profundidade quer segundo a direcção montante-jusante.

Na Fig. 42 apresentam-se as curvas respeitantes a drenos instrumentados na galeria de fundação G145 e que, por isso, funcionam como piezómetros. Para cada um deles (0/11/B, 30/N/A, 105/N/A e 225/S/A), representam-se as curvas correspondentes às parcelas do caudal e da subpressão respeitantes à influência das variações de temperatura.

As variações do caudal, com excepção do 225/S/A, são insignificantes e revelam aumento a meio do ano. O mesmo acontece com as subpressões.

A variação mais acentuada regista-se no 30/N/A, que se situa na fundação da margem direita, e atinge uma amplitude de cerca de 3 bar.

No piezómetro 225/S/A, situado na fundação da margem esquerda, as ondas referentes ao caudal e à subpressão apresentam fases opostas.

iii) A Fig. 43 diz respeito ao efeito da pressão hidrostática na subpressão observada nas câmaras média e superior do piezómetro nº1 do leque P3. Como se pode observar, à subida do nível da água na albufeira corresponde uma diminuição da subpressão na câmara superior e uma quase inexpressiva variação da subpressão na câmara inferior.

Na câmara superior a subida da cota entre 310 e 315 m provoca uma diminuição de cerca de 0,10 MPa na subpressão, que se mantém aproximadamente estável entre 315 e 321 m, para voltar a diminuir cerca de 0,15 MPa quando a cota da água sobe de 321 para 327 m.

Na câmara inferior verifica-se um aumento da subpressão inferior a 0,05 MPa com a subida do nível da água na albufeira da cota 315 para 323 m, voltando a diminuir para cotas superiores.

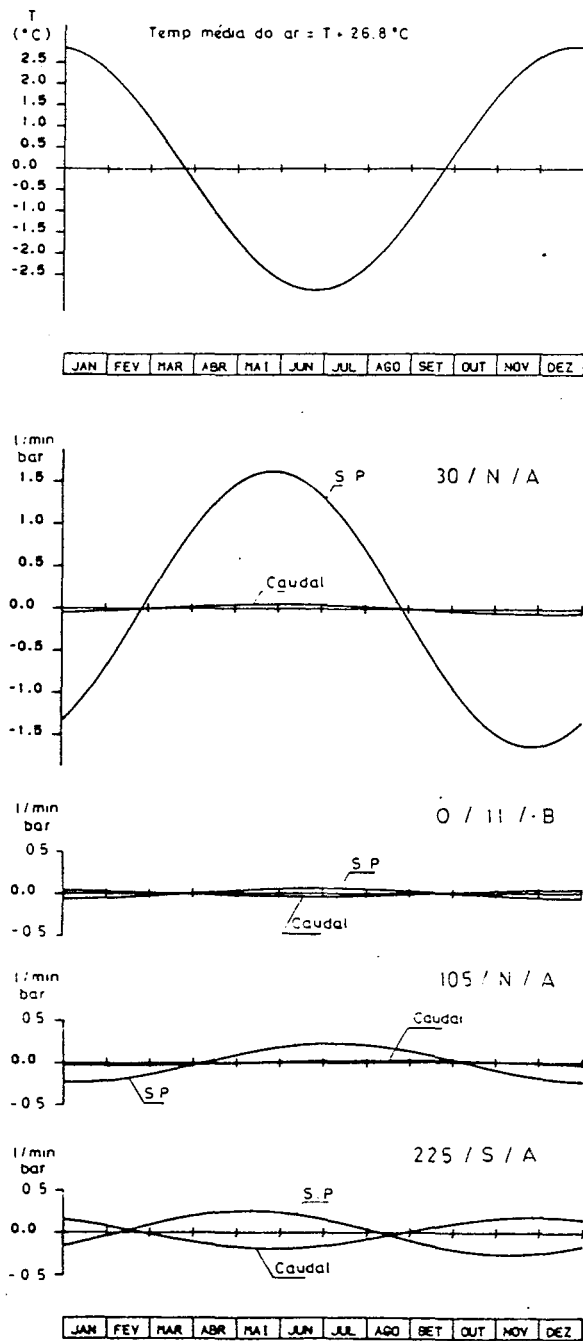


Fig. 42 - Curvas de influência da temperatura em caudais e subpressões medidos em piezómetros da galeria de fundação G145.

A descida do nível da água provoca, obviamente, o fenómeno inverso.

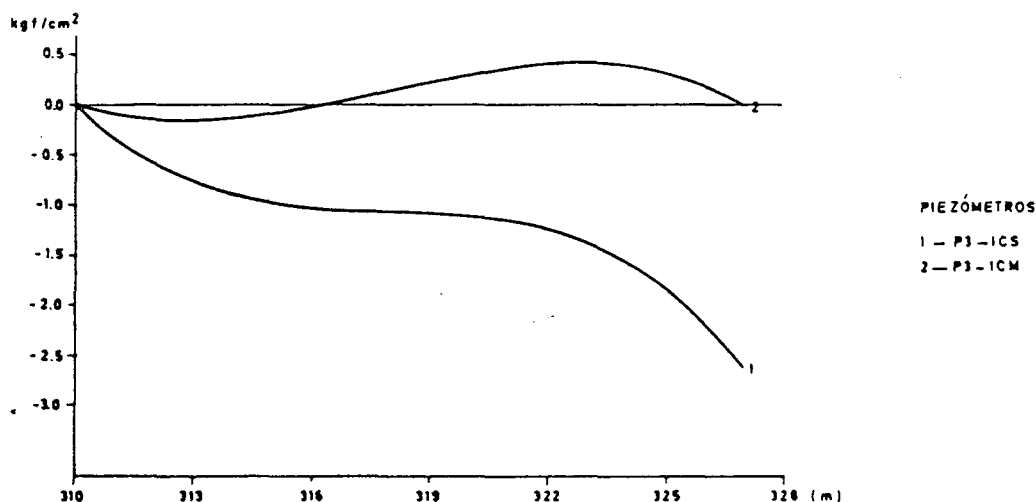


Fig. 43 - Curvas de influência da pressão hidrostática nas subpressões medidas no leque P3.

Este comportamento tinha já sido constatado na análise qualitativa efectuada em 4.2.3.1, sendo portanto natural que ele apareça agora reflectido na análise quantitativa, na medida em que foi utilizada a mesma série de valores para a calibração do modelo estatístico utilizado.

A Fig. 44 respeita à influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões medidas nos piezómetros do leque P4. O caudal da câmara superior do piezómetro nº1 (P4-1CS) é fortemente influenciado pelas variações da pressão hidrostática, em especial para oscilações do nível acima da cota 319 m. À variação de cota entre 319 e 327 m corresponde uma variação de caudal de cerca de 7 l/min. Para variação de nível entre os 310 e os 319 m, as correspondentes variações de caudal são muito pequenas.

A câmara superior do piezómetro nº 3 (P4-3CS) apresenta, para a mesma variação de nível, uma variação de caudal de 2 l/min,



denotando uma sensibilidade maior para variações do nível acima da cota 322 m.

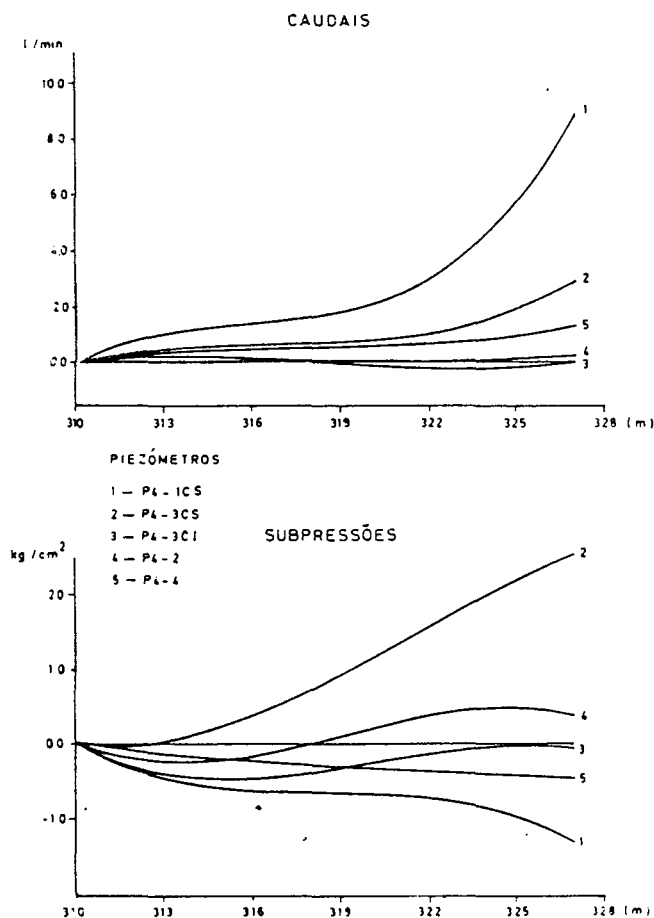


Fig. 44 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões medidos no leque piezométrico P4.

Dos restantes piezómetros, somente o piezómetro nº 4 (P4-4) evidencia alguma sensibilidade, embora diminuta, às variações de nível acima da cota 324 m, e esta deve ser resultante das oscilações do nível da água a jusante provocadas pelas descargas e ou turbinagem da central.

Verifica-se, assim, relativamente à influência da pressão hidrostática, um decréscimo da sua influência nos caudais no sentido de jusante, registando-se a sua maior quebra entre os piezómetros nº 1 e nº 2; porém, volta a subir no piezómetro nº 3.

A explicação para este facto foi encontrada em ensaios realizados em 1985, descritos em 4.2.3.2, e que provaram um relacionamento estreito entre as câmaras superiores daqueles dois piezómetros

tros.

É de admitir que a influência das variações da pressão hidrostática se faz sentir predominantemente na percolação ao nível da zona de contacto betão-rocha, porquanto as câmaras inferiores não a acusam.

Relativamente às subpressões, constata-se que as variações do nível da água na albufeira pouco influem no comportamento dos piezómetros nº 2 e 4 e das câmaras inferiores dos piezómetros nº 1 e 3. Aliás, a subpressão da câmara inferior do piezómetro nº 1 não foi sequer analisada quantitativamente por ser muito baixa.

O piezómetro P4-1CS revela uma relação inversa entre as variações de cota do nível da água na albufeira e as variações da subpressão. Estas variações são, contudo, de pequeno valor; a variação de cota entre 310 e 327 m provoca uma variação da subpressão da ordem de 0,13 MPa.

No piezómetro P4-3CS verifica-se o contrário. Existe uma relação directa e mais significativa entre aquelas variações. A uma variação do nível entre as cotas 313 e 327 m corresponde uma variação da subpressão de 0,25 MPa, com uma relação praticamente linear entre as duas grandezas.

Na Fig. 45 apresentam-se as curvas de influência correspondentes a piezómetros da galeria de fundação (G145).

Verifica-se uma muito pequena influência da pressão hidrostática nos caudais. O piezómetro (dreno) 225/S/A é o que revela maior influência, com variação do caudal de quase 1 l/min para uma variação do nível da água na albufeira entre as cotas 310 e 327 m.

Quanto à influência da pressão hidrostática nas subpressões, o piezómetro (dreno) 105/N/A, localizado na fundação da zona central, no plano de drenagem ascendente, e dirigido para a base da barragem, é o que revela maior sensibilidade, seguido do piezómetro (dreno) 30/N/A, que se localiza na fundação da zona direita e está dirigido também para a base da barragem. Enquanto que no primeiro existe uma relação directa entre a cota do nível da água na albufeira e a subpressão, no segundo essa relação é inversa e de menor significado.

O piezómetro 105/N/A revela, para uma subida do nível entre as cotas 300 e 315 m, um aumento de pressão da ordem de 0,75 MPa, enquanto que entre as cotas 315 e 327 m essa variação é mínima, da

ordem de 0,07 MPa. Portanto, para oscilações da cota no domínio de exploração normal da albufeira, as variações da subpressão são insignificantes.

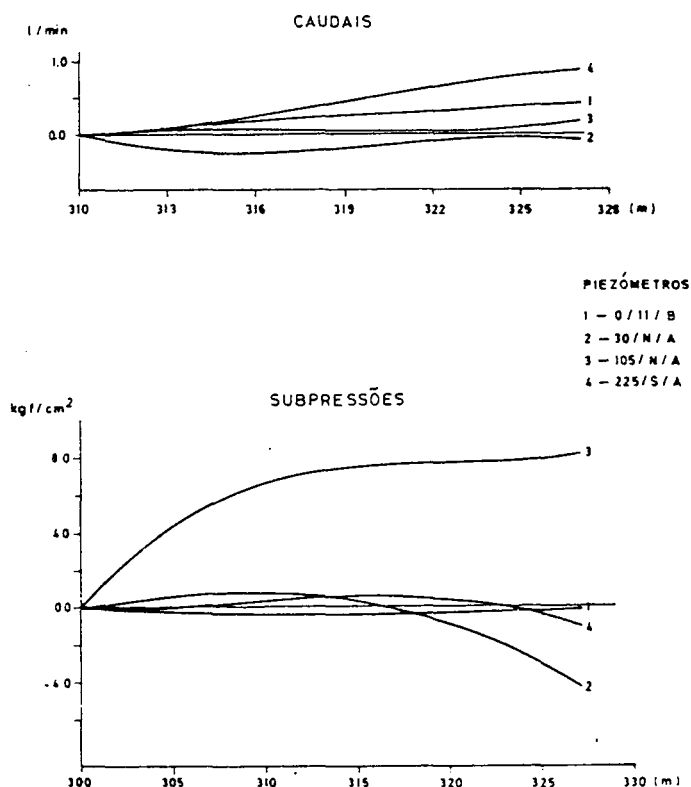


Fig. 45 - Curvas de influência da pressão hidrostática nos caudais e nas subpressões medidos em piezómetros da galeria de fundação G145.

O piezómetro 30/N/A mostra um ligeiro aumento da subpressão, da ordem de 0,1 MPa, quando o nível sobe da cota 300 para 309 m, diminuindo, quando o nível sobe dos 309 para os 327 m, de um valor da ordem de 0,5 MPa.

iv) Os gráficos da Fig. 46 pretendem sintetizar a relação entre caudais e subpressões, em função da pressão hidrostática e da temperatura, constituindo, assim, o corolário da análise que sobre aqueles piezómetros (drenos) se fez atrás. A síntese gráfica está feita para situações da pressão hidrostática correspondentes a níveis da água na albufeira superiores à cota 311 m e, no caso do efeito das variações da temperatura, para valores sazonais extremos.

Relativamente ao efeito da pressão hidrostática, verifica-se

LNEC-Proc. 43/13/9208

que no piezómetro P4-1CS a subida de nível da água na albufeira provoca um aumento significativo do caudal e uma concomitante diminuição, de valor substancialmente mais baixo, da subpressão. No piezómetro P4-3CS verifica-se, para a mesma variação do nível, um aumento quer do caudal quer da subpressão. No primeiro existe uma relação linear entre a variação do caudal e da subpressão, enquanto que no segundo essa relação é do tipo exponencial.

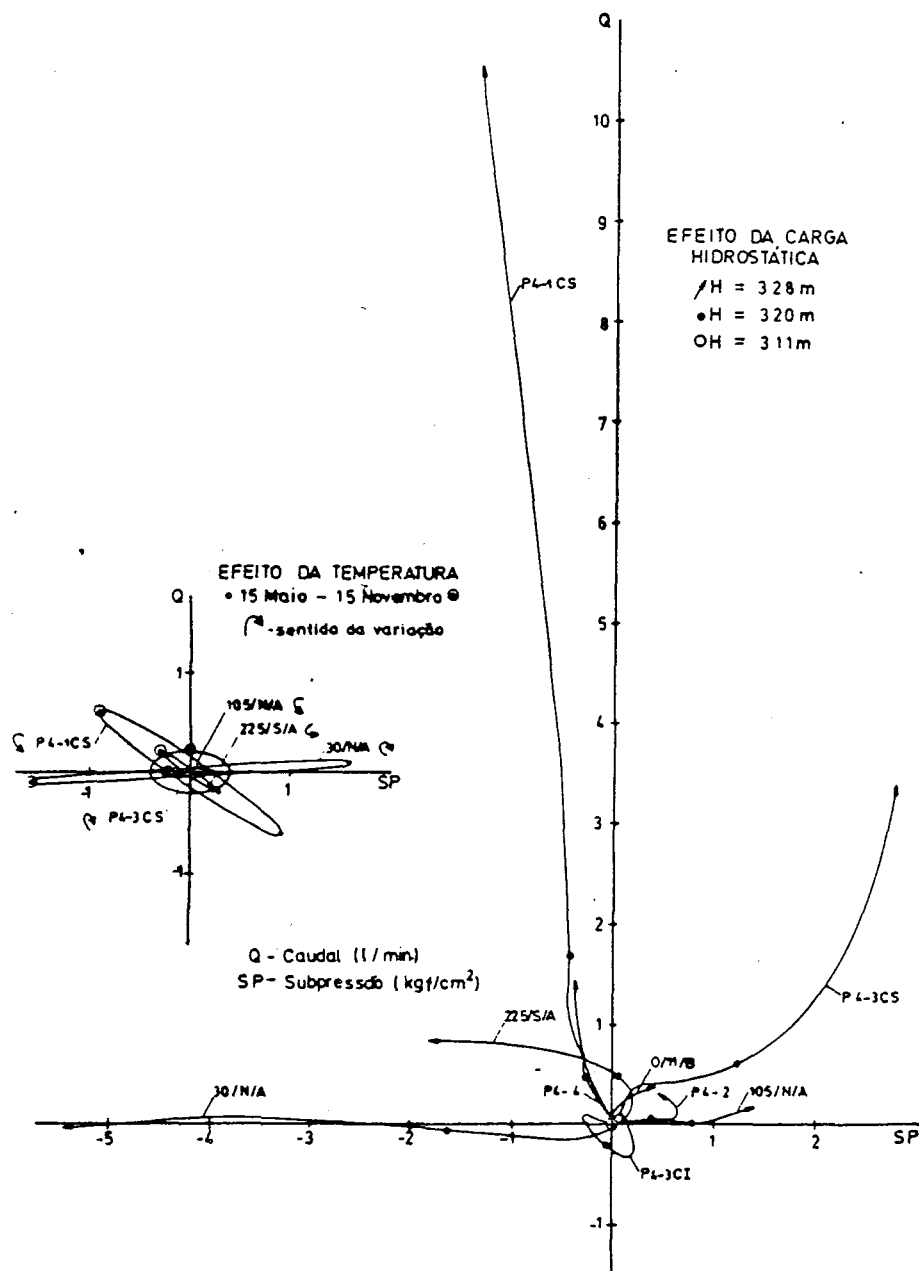


Fig. 46 - Análise piezométrica. Gráficos interpretativos das subpressões e dos caudais drenados.

No piezómetro P4-4 deduz-se um comportamento idêntico ao do P4-1CS, mas com variações de muito menor valor, em especial do caudal.

Os restantes piezómetros não mostram uma interdependência significativa entre as variações do caudal e da subpressão motivadas pelas variações da pressão hidrostática.

No que respeita à influência das variações da temperatura, ela é muito pequena e resulta, aparentemente, da acção induzida pela superestrutura na fundação, como atrás se referiu. Com efeito, a temperatura da água na albufeira abaixo da cota 195 m revela pequenas oscilações ao longo do ano. São, por isso, irrelevantes as variações de viscosidade provocadas na água infiltrada e, pelo mesmo motivo, irrelevante, também, a pulsação térmica do maciço de fundação, cuja temperatura se mantém sem grandes variações, excepto nas zonas superiores dos encontros.

No gráfico do efeito da temperatura constata-se que as variações de subpressão são relativamente mais elevadas do que as correspondentes variações de caudal, dando, assim, elipses de variação cujo eixo maior se desenvolve preponderantemente segundo o eixo das subpressões.

A maior influência das variações da temperatura regista-se nos piezómetros P4-1CS (galeria periférica) e 30/N/A (galeria de fundação - G145). O primeiro apresenta uma amplitude de variação anual da subpressão da ordem de 0,18 MPa e de caudal da ordem de 1,2 l/min, enquanto o segundo apresenta amplitudes da ordem de 0,32 MPa e de 0,2 l/min, respectivamente. Seguem-se-lhes, por ordem decrescente, os piezómetros P4-3CS, 225/S/A e 105/N/A. As maiores amplitudes de variação correspondem ao período cujos extremos se centram em Maio e Novembro, com excepção do piezómetro P4-3CS, cuja maior amplitude se verifica entre Fevereiro e Agosto. Pode observar-se, ainda, que o sentido da variação das grandezas não é o mesmo em todos os piezómetros. Esse facto terá provavelmente que ver com a localização e orientação dos piezómetros e, conseqüentemente, com os ajustamentos relativos operados nas feições estruturais do maciço de fundação provocadas pelos estados de tensão impostos pelo funcionamento estrutural da barragem.

v) As variações de caudal e de subpressão atribuíveis ao efeito de tempo representam-se nos gráficos das Fig. 47 a 49.

Na Fig. 47, referente à câmara intermédia do piezómetro nº 1

do leque P3, pode observar-se que a parcela de caudal atribuível ao efeito de tempo cresce de forma progressiva entre 1979 e 1985 cerca de 4 l/min. A subpressão, após crescimento até 1981 cerca de 0,15 MPa, tem revelado tendência para estabilizar. Aparentemente, se atentarmos na evolução do nível da água na albufeira (Fig. 18), poderá deduzir-se ligeira tendência correlativa entre estas duas grandezas.

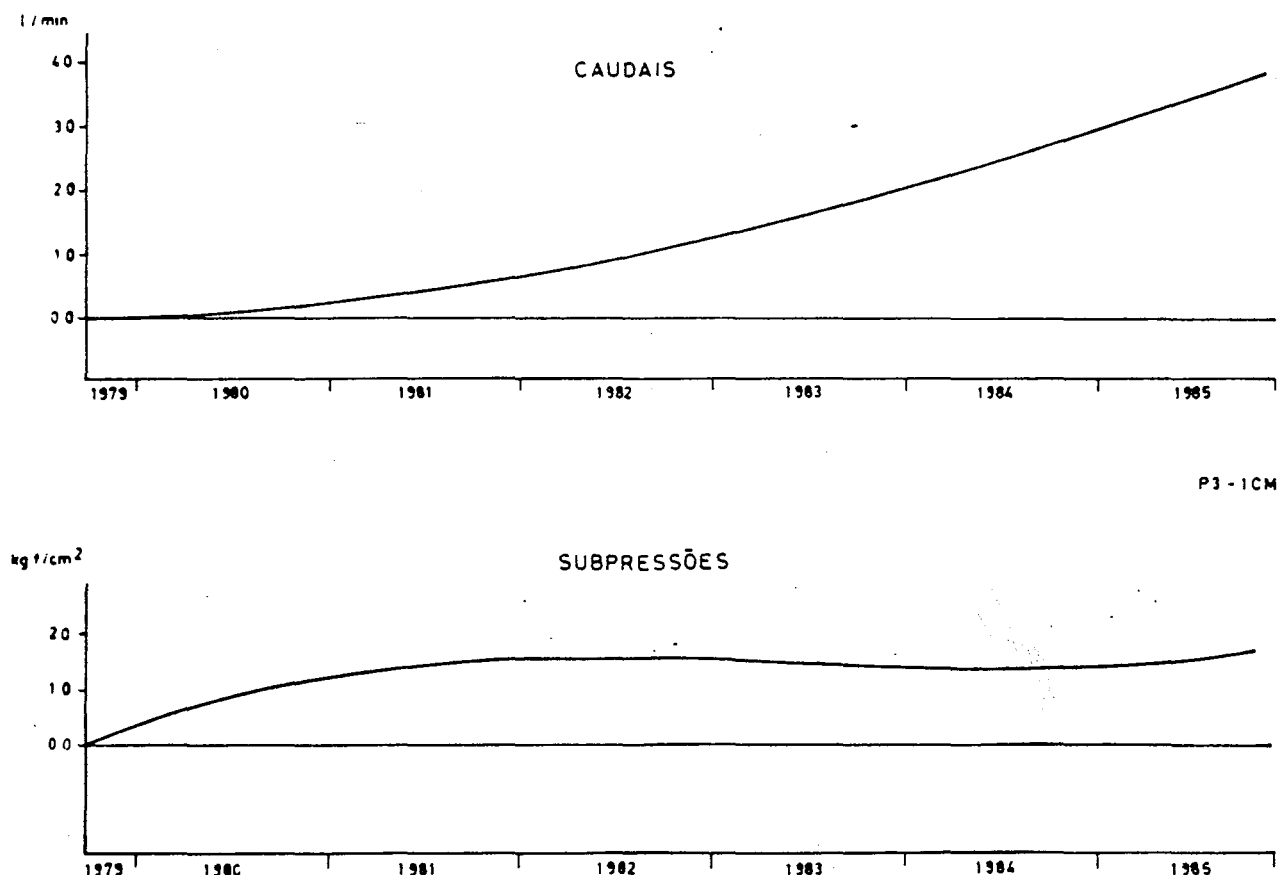


Fig. 47 - Curvas do efeito do tempo no caudal e na subpressão medidos no piezómetro P3-1CM.

As curvas correspondentes ao leque P4 apresentam-se na Fig. 48. Relativamente aos caudais, a câmara superior do piezómetro nº1 (P4-1CS) revela um aumento entre 1979 e 1985 de cerca de 8 l/min, com taxa que a partir de 1983 se apresenta decrescente. Os restantes piezómetros, à excepção do P4-4, cujo caudal se mantém estável desde 1979, revelam uma ligeira diminuição do caudal, com aparente tendência para estabilizar após 1983.

Quanto à evolução das subpressões, constata-se no P4-1CS uma ligeira diminuição de cerca de 0,10 MPa, com tendência para estabilizar a partir de 1983. Observa-se uma evolução irregular do P4-3CS, com aumento de cerca de 0,12 MPa até 1980, seguida de

uma diminuição de cerca de 0,40 MPa até 1984 e, posteriormente, de novo aumento, com tendência para prosseguir. Este comportamento, já assinalado na análise qualitativa, parece poder relacionar-se com a evolução do nível da água na albufeira e, eventualmente, também com a evolução do nível de jusante.

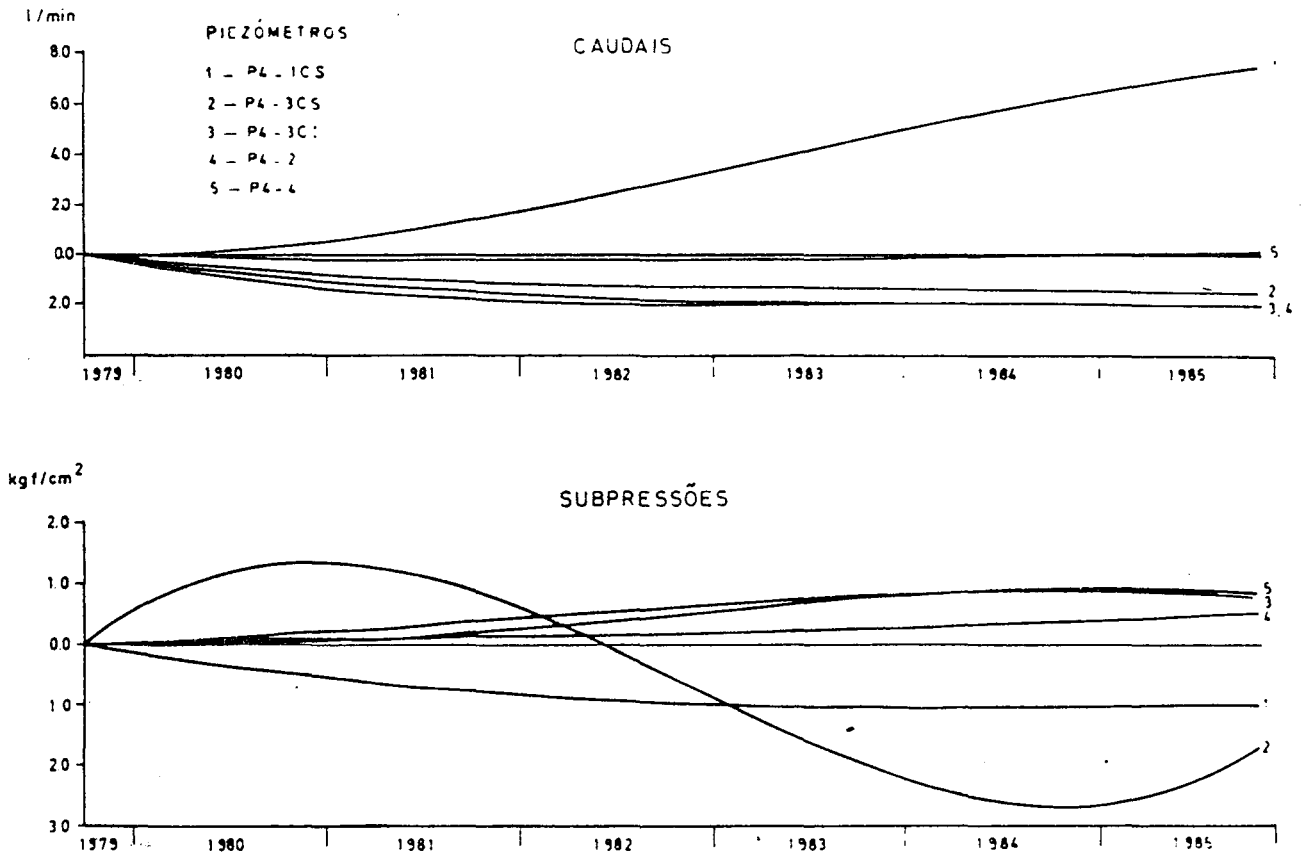


Fig. 48 - Curvas do efeito do tempo nos caudais e subpressões medidos nos piezómetros do leque P4.

Os restantes piezómetros do leque evidenciam uma relativa estabilidade da subpressão ao longo do tempo, com uma ligeira subida, inferior a 0,10 MPa até 1984, e posterior tendência para estabilizar ou, até, diminuir, à excepção do P4-2 que revela tendência para aumentar, embora, com valores ainda muito baixos.

As curvas correspondentes aos piezómetros da galeria de fundação (G145) apresentam-se na Fig. 49. Com excepção do piezómetro 30/N/A, que apresenta um aumento progressivo do caudal, de pequeno valor, os restantes mostram uma evolução decrescente dos caudais, também de pequeno valor nos piezómetros 0/11/B e 105/N/A, e mais acentuada no piezómetro 225/S/A, em que atinge cerca de 2 l/min entre 1977 e 1985. O caudal apresenta, ainda, no 0/11/B tendência para estabilizar, enquanto no 30/N/A e no 105/N/A apresenta

tendência para aumento, neste último depois de ter diminuído até 1983; no 225/S/A revela tendência para continuar a baixar.

Em relação às subpressões, verifica-se em todos eles uma tendência inicial para diminuição, que se prolongou até 1980, tendo posteriormente seguido uma evolução crescente, mais acentuada no piezómetro 30/N/A, e menos acentuada nos restantes. O piezómetro 0/11/B é o que regista menor taxa de crescimento da subpressão. Desde o início de 1981 até final de 1985, ter-se-iam verificado os seguintes aumentos médios da subpressão: 0,15 MPa no 0/11/B; 0,51 MPa no 30/N/A; 0,27 MPa no 105/N/A; e 0,26 MPa no 225/S/A.

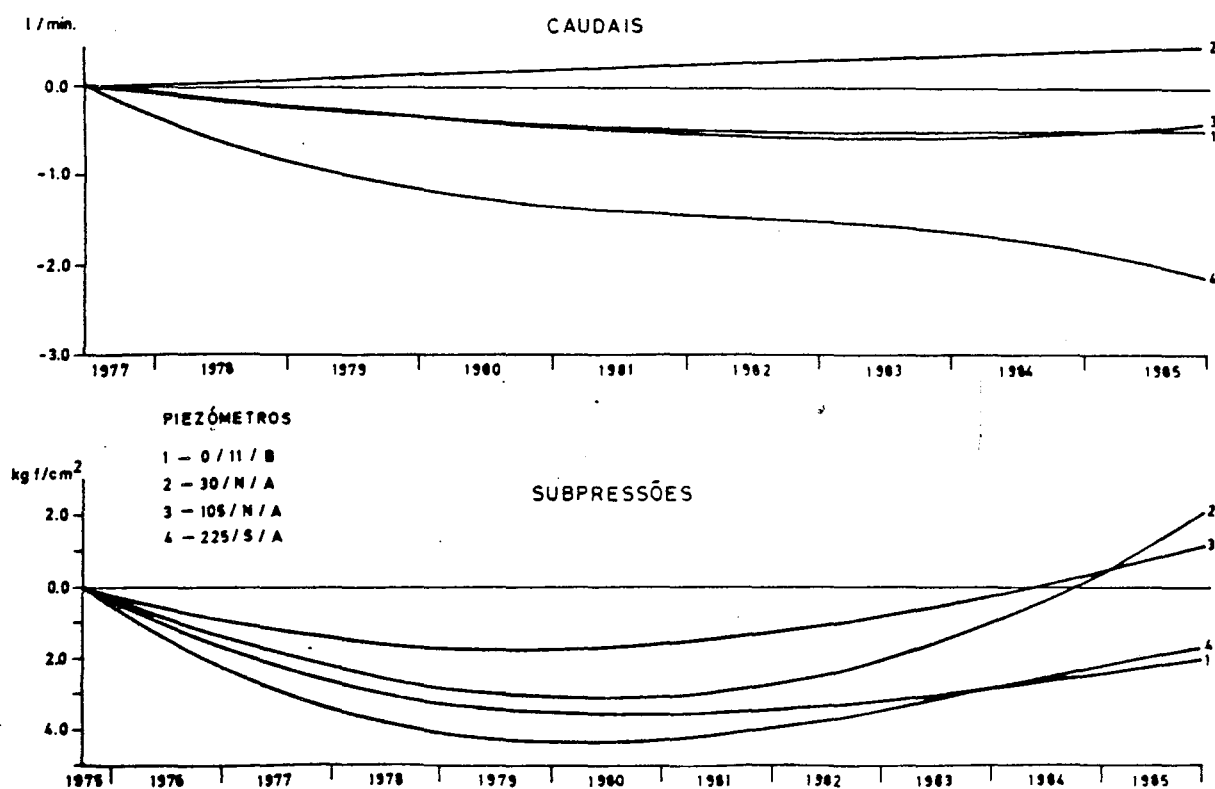


Fig. 49 - Curvas do efeito do tempo nos caudais e nas subpressões medidos em piezómetros da galeria de fundação G145.



## 5 - ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO

### 5.1 - Composição química da água da albufeira

Com vista a quantificar o conjunto de factores dependentes da qualidade da água, foram realizadas colheitas de água do rio Zambeze em épocas anteriores à instalação da albufeira e efectuadas as respectivas análises de caracterização química. Os valores de que dispomos, referentes a análises no período de 1966 a 1968, permitem concluir que a água do rio era agressiva devido à presença de anidrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) livre, possuía muito baixa mineralização e, conseqüentemente, também baixo teor em iões agressivos. Em valores médios, determinados com base nas análises efectuadas naquele período, a água apresentava um resíduo seco a  $180^\circ\text{C}$  de 84,1 mg/l, um pH de 7,6 e um índice de agressividade para o carbonato de cálcio de 0,57 ( $\text{pH}_f - \text{pH}_i$ ), relativamente baixo. O seu poder dissolvente ficava, assim, a dever-se à presença de  $\text{CO}_2$  livre.

Posteriormente, com vista à avaliação da qualidade da água da albufeira, e das suas características de agressividade, estabeleceu-se um programa de colheita e análise sistemática, que teve início em 1977, e que, desde 1979, tem tido uma periodicidade aproximadamente mensal.

A primeira constatação a fazer ao fim deste período é a de que a água tem mantido uma certa constância de qualidade química, a qual, em termos de composição iónica, permite classificá-la como bicarbonatada cálcica.

Na Fig. 50 apresenta-se o gráfico de evolução da mineralização da água da albufeira, colhida à profundidade de 0,5 m e a cerca de 100 m do paredão da barragem; a colheita de ABR77 foi efectuada à profundidade de 28 m. Na mesma figura indicam-se as cotas de colheita, as quais, na prática, representam a cota do nível de água na albufeira.

Os valores da mineralização apresentados foram obtidos de análises químicas completas realizadas à água colhida, e representam a composição iónica da água em termos de total de sais dissolvidos (TSD). Nas análises foram considerados os seguintes iões que concorrem para o TSD:

Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, S<sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>.

Pode verificar-se, pelos valores apresentados, que a mineralização é baixa e tem uma distribuição irregular ao longo do período analisado. Observam-se, no entanto, algumas tendências, designadamente: o abaixamento do TSD com o aumento do nível de água da albufeira, para as situações de variação mais rápida; o aumento do TSD no último trimestre do ano.

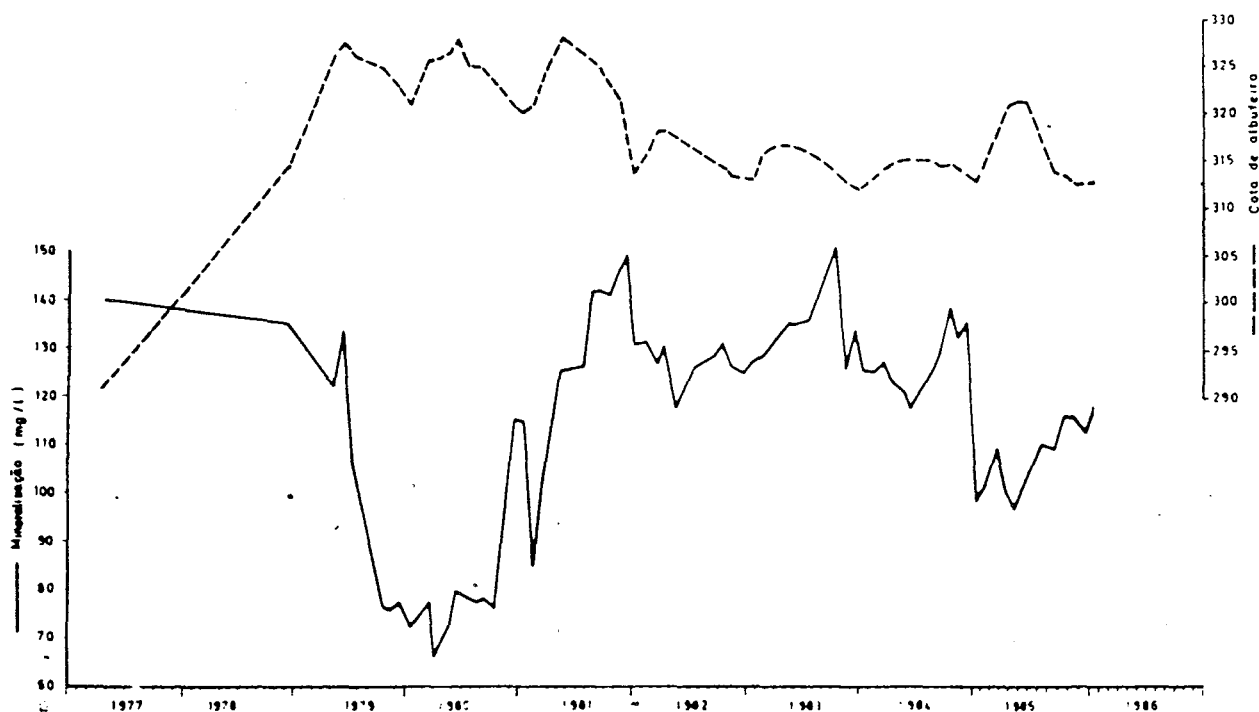


Fig. 50 - Evolução da mineralização da água da albufeira entre 1977 e 1985.

É de realçar os valores relativamente baixos ocorridos em 1979-1980. Possivelmente, esta situação está relacionada com o facto, atrás referido, de corresponder a um período de níveis elevados, portanto com caudais afluentes também elevados. A sua justificação poderá basear-se, por um lado, nas características de escoamento na bacia e no curso de água, com velocidades mais elevadas e, portanto, com menor tempo de contacto com as formações rochosas que contribuem para a mineralização da água. Por outro lado, também, a elevada precipitação atmosférica e correspondente acumulação de água terá feito baixar a concentração de sais dissolvidos. A continuação das observações, abrangendo situações idên-

ticas de exploração da albufeira contribuirá para um melhor esclarecimento futuro desta questão.

Salienta-se, ainda, o facto de os valores da mineralização, com excepção do período atrás referido, serem ligeiramente superiores aos valores observados antes da constituição da albufeira. Constata-se, igualmente, um ligeiro endurecimento da água, (aumento das concentrações de cálcio e de magnésio), embora se possa considerar que existe uma ténue tendência para diminuição dos valores globais da mineralização após 1981.

Na Fig. 51 apresentam-se os gráficos de evolução dos principais catiões pesquisados. O potássio (K) só começou a ser avaliado a partir de 1982.

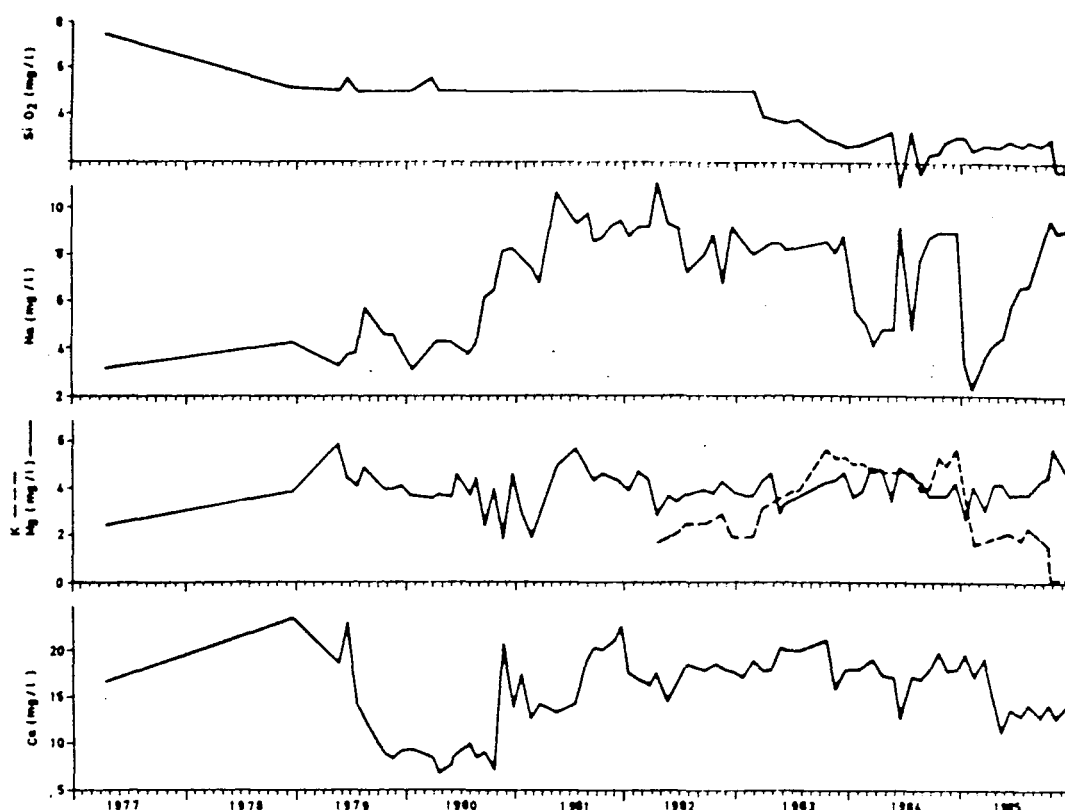


Fig. 51 - Evolução das concentrações de alguns catiões na água da albufeira entre 1977 e 1985.

A concentração dos iões representados (sódio, magnésio, potássio e cálcio) é para todos eles baixa; os valores mais elevados respeitam ao cálcio.

A evolução das concentrações revela uma certa irregularidade, mais acentuada no sódio e no cálcio. Este último catião, aliás, apresenta uma evolução muito semelhante à observada para o TSD,

atrás referida. A evolução da concentração do sódio apresenta, ainda, alguma semelhança com a do TSD, embora menor que a do cálcio; a do magnésio, praticamente, não apresenta com ela qualquer relação aparente.

Pretendeu-se avaliar qual dos iões contribuía de forma mais significativa para as variações de mineralização da água detetadas. As regressões efectuadas entre os seus teores e o TSD revelaram o seguinte relacionamento:

$$\text{TSD} = 4,66 \text{ Ca}^{2+} + 41,56 ; \text{ c. correlação} = 0,9$$

$$\text{TSD} = 6,03 \text{ Na}^+ + 73,75 ; \text{ c. correlação} = 0,6$$

$$\text{TSD} = 3,05 \text{ Mg}^{2+} + 102,25; \text{ c. correlação} = 0,1$$

Daqui se pode inferir que são os valores do cálcio dissolvido que mais fortemente influenciam a qualidade da água, verificando-se, também, uma certa influência por parte do sódio. O magnésio, como já se referiu anteriormente, não representa qualquer influência, mantendo um valor médio constante ao longo do período observado.

Aparentemente, o comportamento do sódio parece indicar uma ligeira tendência para diminuição dos seus teores depois de 1981, ano em que atingiu os valores mais elevados. O mesmo parece ocorrer com o cálcio após subida progressiva dos teores até 1983.

A evolução das concentrações observadas nos aniões mais importantes ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) é representada nos gráficos da Fig. 52.

O ião bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) apresenta as concentrações mais elevadas, seguido à distância do ião cloreto ( $\text{Cl}^-$ ). O ião sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) apresenta os valores mais baixos.

A tendência evidenciada pela evolução dos valores do bicarbonato é muito idêntica à já observada no cálcio. Essa identidade é realçada pela regressão efectuada entre as concentrações dos dois iões, em que se obteve a seguinte relação, com elevado coeficiente de correlação:

$$\text{HCO}_3^- = 2,86 \text{ Ca}^{2+} + 23,82; \text{ c. correlação} = 0,9$$

Os iões sulfato e cloreto apresentam, a partir de 1981, uma redução progressiva das suas concentrações, mais acentuada no primeiro.

O cloreto e o sódio, tal como o bicarbonato e o cálcio, evidenciam um comportamento das suas concentrações ao longo do tempo muito semelhante. Regressão efectuada entre elas revela o seguinte relacionamento:

$$\text{Na}^+ = 0,37 \text{ Cl}^- + 3,6; \text{ c. correlação} = 0,7$$

Neste caso, a correlação não é tão forte, não deixando, no entanto, de ser importante.

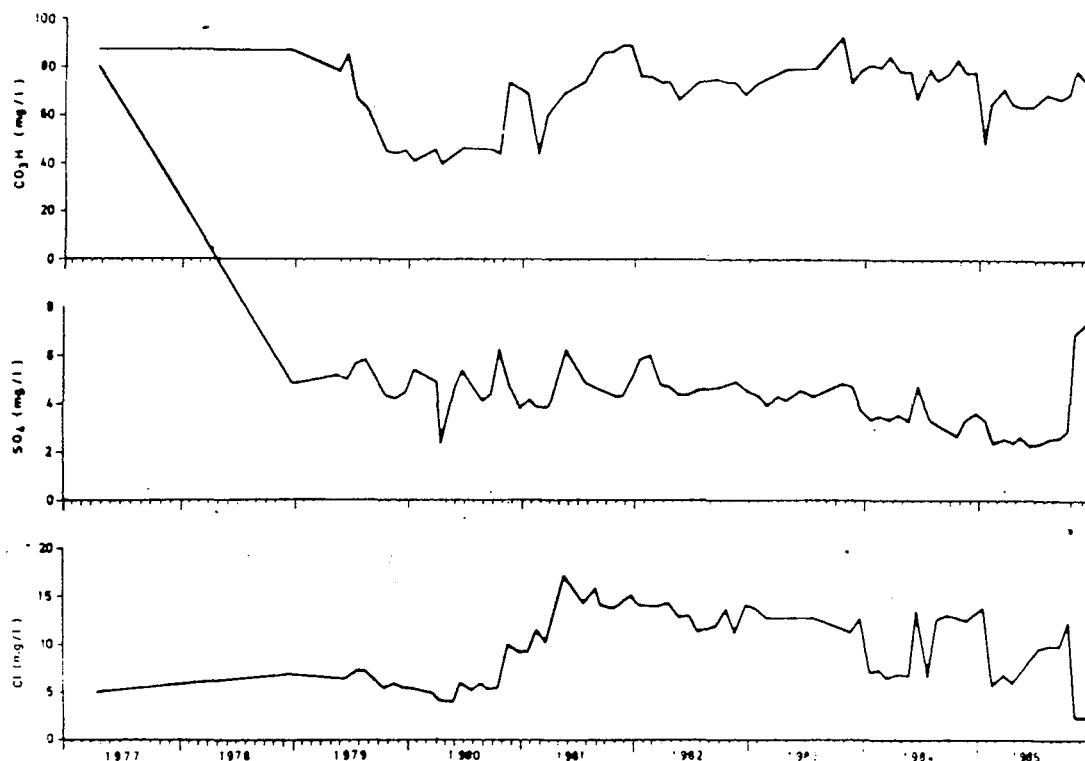


Fig. 52 - Evolução da concentração de alguns aniões na água da albufeira entre 1977 e 1985.

Os gráficos da Fig. 53 representam a evolução de algumas características físico-químicas da água, nomeadamente o teor em dióxido de carbono livre ( $\text{CO}_2$ ), o pH, a temperatura (a partir de 1983) e o índice de agressividade para o carbonato de cálcio (i).

O índice de agressividade, neste caso, corresponde ao índice de saturação da água, cujo pH de equilíbrio é determinado segundo o gnomograma de Hoover-Langelier, e é dado pela seguinte expressão:

$$i = \text{pH (equilíbrio)} - \text{pH (medido)};$$

daqui resulta que, se:

$$i < 0, \text{ a água é incrustante};$$

$i = 0$ , a água está em equilíbrio;

$i > 0$ , a água é agressiva.

Esta forma de determinação da agressividade da água para o  $\text{CO}_2/\text{Ca}$  não é isenta de erros, dependendo estes dos cuidados a ter na recolha, acondicionamento e transporte das amostras. Variações de, por exemplo, 0,2 no pH são já importantes para o estado de equilíbrio da água e sabe-se que, em geral, o pH tende a aumentar ligeiramente devido, principalmente, à libertação de  $\text{CO}_2$ , situação que pode ocorrer durante a manipulação das amostras.

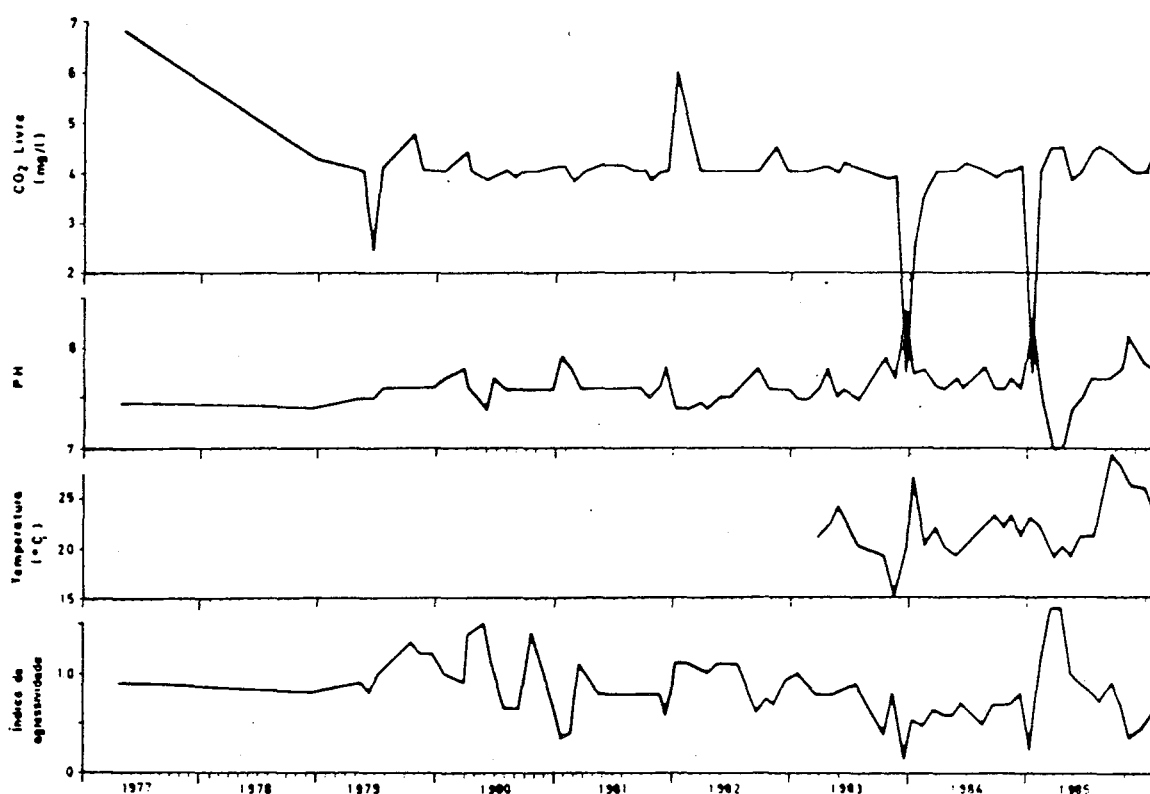


Fig. 53 - Evolução de algumas características físico-químicas da água da albufeira entre 1977 e 1985.

Como se pode observar, o teor em  $\text{CO}_2$  na água da albufeira próximo da superfície é relativamente baixo, da ordem de 4 mg/l, e, a parte pequenas oscilações pontuais, tem-se mantido, praticamente, constante. Os valores que aparecem em pico e que se reflectem depois no pH e índice de agressividade poderão ficar a dever-se a erros motivados pelo acondicionamento e transporte da amostra.

Colheitas feitas em profundidade (até 50 m) revelam um aumento

muito pequeno do teor em CO<sub>2</sub> livre.

Os valores de pH apresentam ligeiras oscilações em torno de um valor médio da ordem de 7,6. Exceptuando o abaixamento ocorrido em Abril - Maio de 1985, parece desenhar-se uma tendência, desde 1979, para aumento do valor do pH.

Os valores excepcionais registados em DEZ83 e JAN85 poderão ficar a dever-se, tal como se disse atrás, a erros metodológicos. Em Março - Abril de 1985 o abaixamento do pH poderá estar relacionado directamente com a renovação da massa superficial de água, com água jovem e de menor pH, e, ainda, com o arraste de matéria orgânica pela escorrência superficial e a sua posterior concentração e decomposição na albufeira, aumentando ligeiramente a acidez da água.

Relativamente à agresividade da água, observa-se alguma tendência para diminuição dos valores do índice de agresividade para o carbonato de cálcio. Exceptua-se, em relação a este comportamento, o ano de 1985, em que se registaram os valores máximos observados até então. Esse período corresponde aos meses de Março e Abril, e nele se verificaram, como atrás foi referido, valores mais reduzidos do pH e da concentração de alguns iões, nomeadamente sódio e cloro, e mais elevados do teor em CO<sub>2</sub> livre.

O teor em oxigénio dissolvido apresenta valores relativamente baixos e aproximadamente constantes, que em média se situam na ordem dos 6,8 mg/l (Fig. 54). As maiores variações observadas

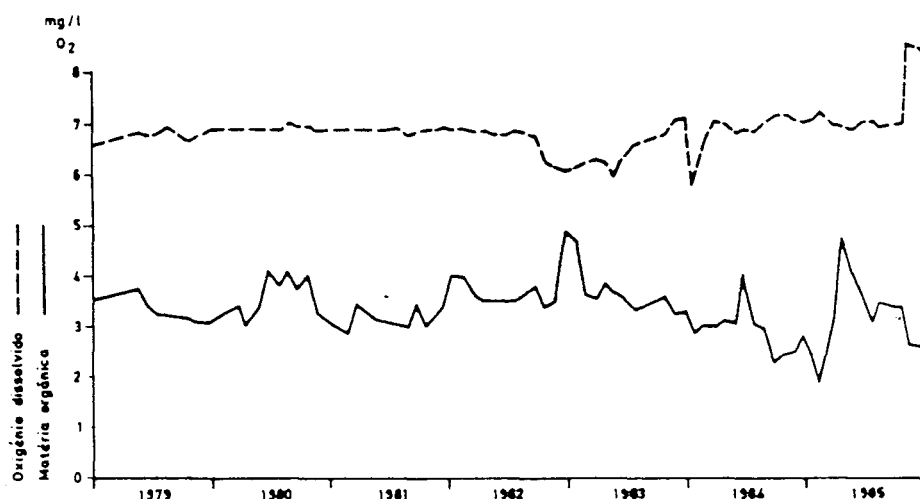


Fig. 54 - Evolução dos teores em oxigénio dissolvido e em matéria orgânica na água da albufeira entre 1977 e 1985.

registaram-se entre Setembro de 1982 e Março de 1984, em que, por vezes, os teores desceram a valores da ordem dos 6 mg/l, e entre Outubro de 1985 e Março de 1986 (não representado na figura), em que subiram a 8,6 mg/l.

A matéria orgânica, quantificada em termos de oxigénio consumido em meio ácido, apresenta oscilações mais acentuadas e uma evolução irregular (Fig. 54), aparentemente com lei sinusoidal de período plurianual. Os valores mais elevados, embora se registem também na época chuvosa, parecem ocorrer preferencialmente nas épocas de estiagem, o que é natural devido ao decaimento posterior à floração aquática, com o conseqüente aumento da quantidade de matéria orgânica em suspensão. Os valores mais baixos ocorrem, geralmente, em épocas mais quentes e chuvosas.

Estas considerações basearam-se sómente na análise dos resultados disponíveis e das condições climáticas normais da região; não tiveram em conta as condições específicas da exploração da albufeira, caudais afluentes e efluentes, nem as condições climáticas especiais ocorridas na respectiva bacia hidrográfica, por dificuldade na obtenção desses dados. Em futura análise, mais aprofundada, esses aspectos serão então tidos em consideração.

## 5.2 - Composição química da água percolada

Em Novembro de 1985, procurando reatar a realização sistemática da observação das características físicas e químicas da água percolada, realizou-se no Laboratório de Análises da HCB no Songo um conjunto de análises de água colhidas em alguns drenos e piezómetros, e de água da albufeira colhida a várias profundidades. Algumas dessas águas foram objecto de análise completa, que procurou quantificar as concentrações dos iões  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , e, ainda, o pH, teor em  $\text{CO}_2$  livre, condutividade e temperatura; outras foram somente objecto de análise simplificada, a qual permitiu quantificar as concentrações em  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , e, ainda, pH,  $\text{CO}_2$  livre, condutividade e temperatura. Foram também determinados para todas as amostras o residuo sêco, alcalinidade e pH de saturação.

O objectivo era, numa primeira e simples interpretação dos resultados, fazer um juízo da forma como a água de percolação actuava quimicamente no maciço de fundação. E, numa análise poste-



rior, potenciada com novos dados de observação, fazer a avaliação da influência da percolação na alteração química dos materiais e a sua implicação nas características hidrogeotécnicas do maciço de fundação.

Na Fig. 55 representa-se em diagrama de Piper e em gráfico a qualidade das águas que foram objecto de análise química completa. Trata-se de águas de fácies bicarbonatada sódica a bicarbonatada cálcica.

Uma análise sumária da figura revela um ganho em concentração, em relação à água da albufeira, dos iões sódio e potássio em 52% das análises e do ião cálcio nos restantes 48%. Em 76% regista-se, também, um acréscimo, pouco significativo, da concentração do ião sulfato, e uma percentagem muitíssimo inferior de acréscimo na concentração dos iões cloreto e bicarbonato.

Se ao conjunto das análises completas representadas naquela figura juntarmos as análises simplificadas, verificamos que se registam, nas águas de drenos das galerias de fundação G145, GE5, TGE5, GD5 e TGD5, em relação aos teores dos iões da água da albufeira, ganhos de cálcio em 41,2% das águas analisadas, de magnésio em 17,6%, de sódio em 100%, de potássio em 71,4% e de sílica em 14,3%. Por seu turno, na galeria periférica registam-se ganhos de cálcio em 68,6% das águas analisadas, de magnésio em 8,6%, de sódio em 100%, de potássio em 13,3% e de sílica em 73,3%.

Efectuado o balanço do aumento (positivo) e da diminuição (negativo) da concentração de sais das águas percoladas em relação à água da albufeira, verifica-se que: na galeria periférica ele é positivo para os iões sílica, cálcio e sódio, e negativo para os iões magnésio e potássio; nas galerias da fundação, particularmente na G145, o balanço é positivo para os iões sódio e potássio, e negativo para a sílica, cálcio e magnésio.

Nas Fig. 56 e 57 apresentam-se os gráficos de distribuição do cálcio, sódio, sílica, temperatura da água, pH, subpressão e caudal medidos ao longo das rédes de drenagem da galeria periférica e da galeria de fundação G145 em Novembro de 1985.

Analisando os gráficos da galeria periférica (Fig. 56), verifica-se que: em relação à água da albufeira os teores mais elevados em cálcio observam-se em águas drenadas na fundação dos

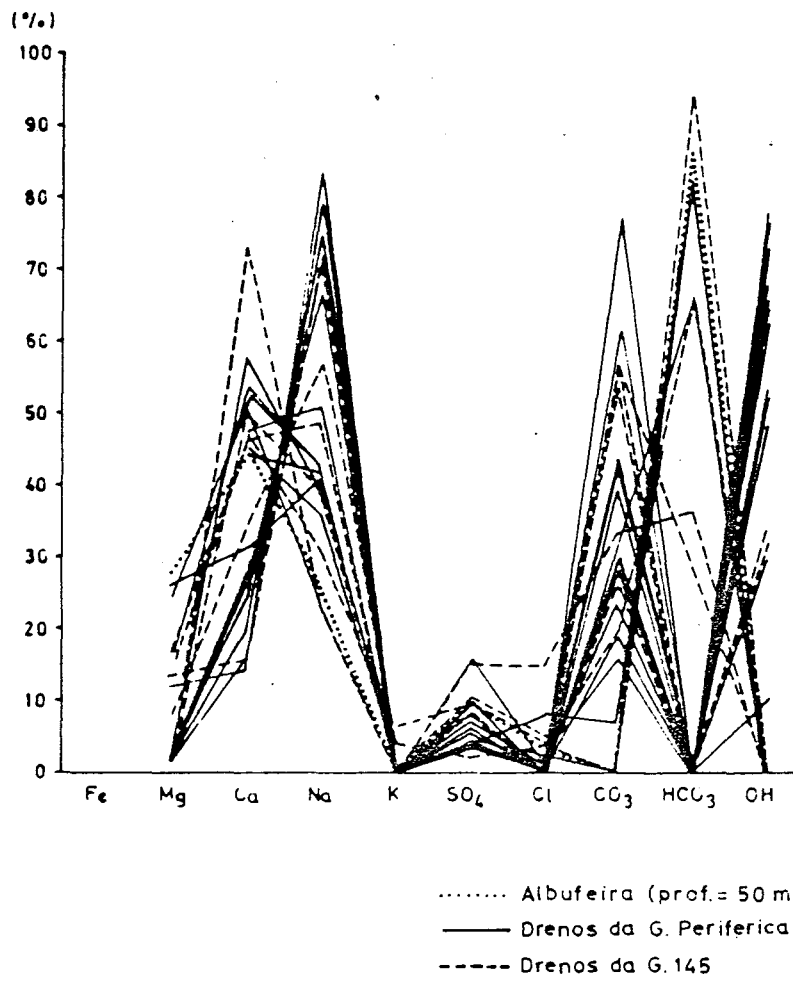
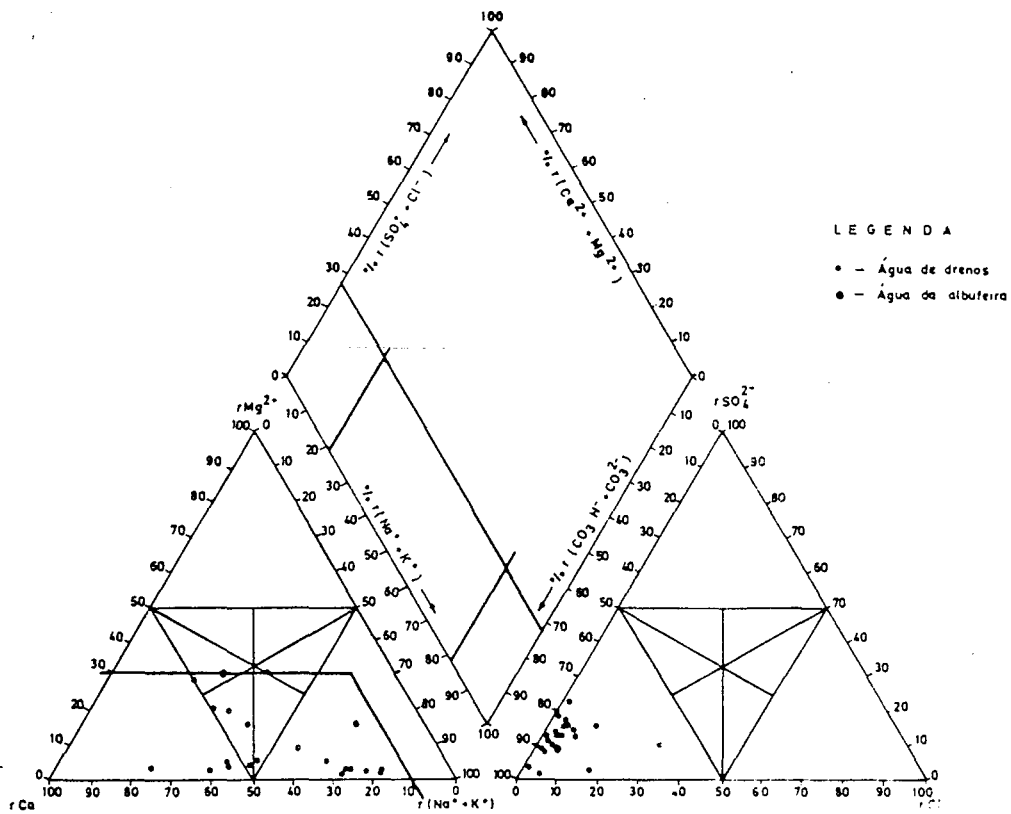


Fig. 55 - Caracterização química da água drenada em Novembro de 1985.

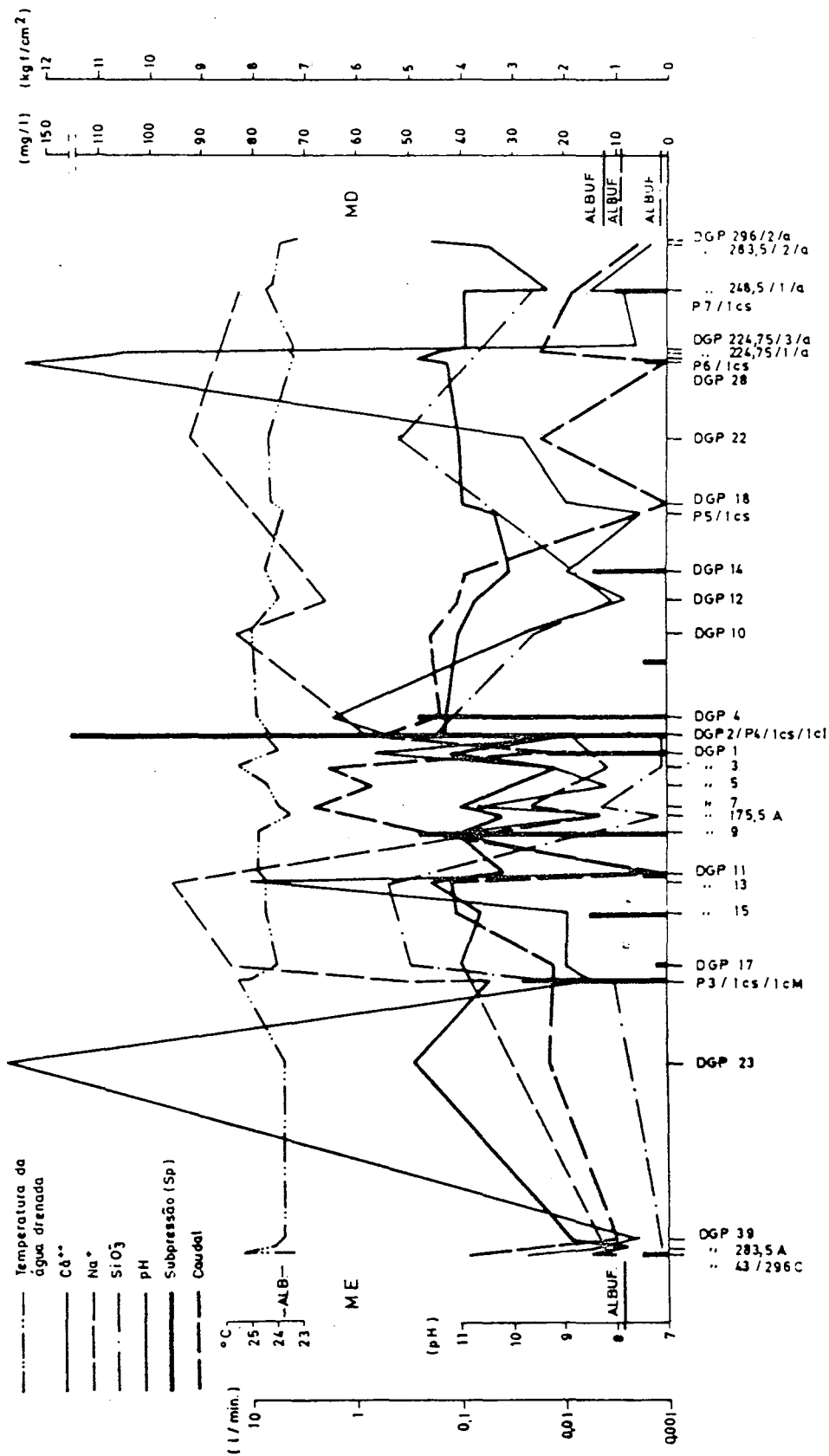


Fig. 56 - Caracterização físico-química das águas drenadas pela galeria periférica em Novembro de 1985.

blocos 11-13, 5-7, 1-3, 0-1, 0-2, 4-6, 12-14, 14-16 e 16-18; os teores mais elevados de sódio observam-se nas águas drenadas pela fundação dos blocos 7-9, 5-7, 0-2, 4-6, 6-8, 12-14 e 18-20; os teores em sílica são mais elevados nas águas drenadas pela fundação dos blocos 7-9, 5-7, 0-2, 4-6, 12-14 e 18-20; e os valores do pH, bastante elevados, na maior parte dos casos superiores a 10 (pH da albufeira = 7,9), apresentam distribuição com alguma irregularidade, mas com variações não muito acentuadas. Os valores mais baixos ocorrem, geralmente, em drenos com caudal mais elevado dos blocos 19-21, 0-1 e 18-20.

A temperatura da água drenada apresenta, também, alguma variação ao longo da fundação, embora com valores geralmente superiores ao da água da albufeira, em especial na zona central do vale.

Constata-se, por outro lado, que as temperaturas mais elevadas correspondem a águas debitadas por drenos ou piezómetros cujas zonas mais produtivas (maior admissão de água) se situam a profundidades maiores.

As subpressões e os caudais drenados apresentam, globalmente, valores mais elevados na zona central (alíneas 4.2.2.1 e 4.2.3.1).

Quanto à galeria de fundação G145 (Fig. 57), observa-se, em relação às características da água da albufeira, o seguinte: os teores de cálcio distribuem-se irregularmente ao longo da rede de drenagem, apresentando valores mais elevados na zona da fundação alinhada com o bloco 2-4, 3-5 e 5-7; relativamente ao sódio, os teores mais elevados registam-se na água drenada pelas zonas da fundação alinhadas com os blocos 1-3 e com os blocos da margem direita; os teores em sílica são baixos, próximos do da água da albufeira, ocorrendo os mais elevados na zona central da fundação; a temperatura apresenta uma distribuição irregular, com variações muito mais acentuadas do que as observadas na galeria periférica, e com nitida tendência para aumento no sentido dos extremos da galeria.

O pH apresenta variações acentuadas, com tendência generalizada para valores mais elevados no sector da fundação do lado da margem esquerda.

Os caudais apresentam uma certa uniformidade nesse mesmo sector da fundação, ocorrendo as maiores variações no sector do lado da margem direita. As subpressões geradas, quando se obturam os

drenos, são também mais elevadas no sector da fundação do lado da margem esquerda (alínea 4.2.3.1).

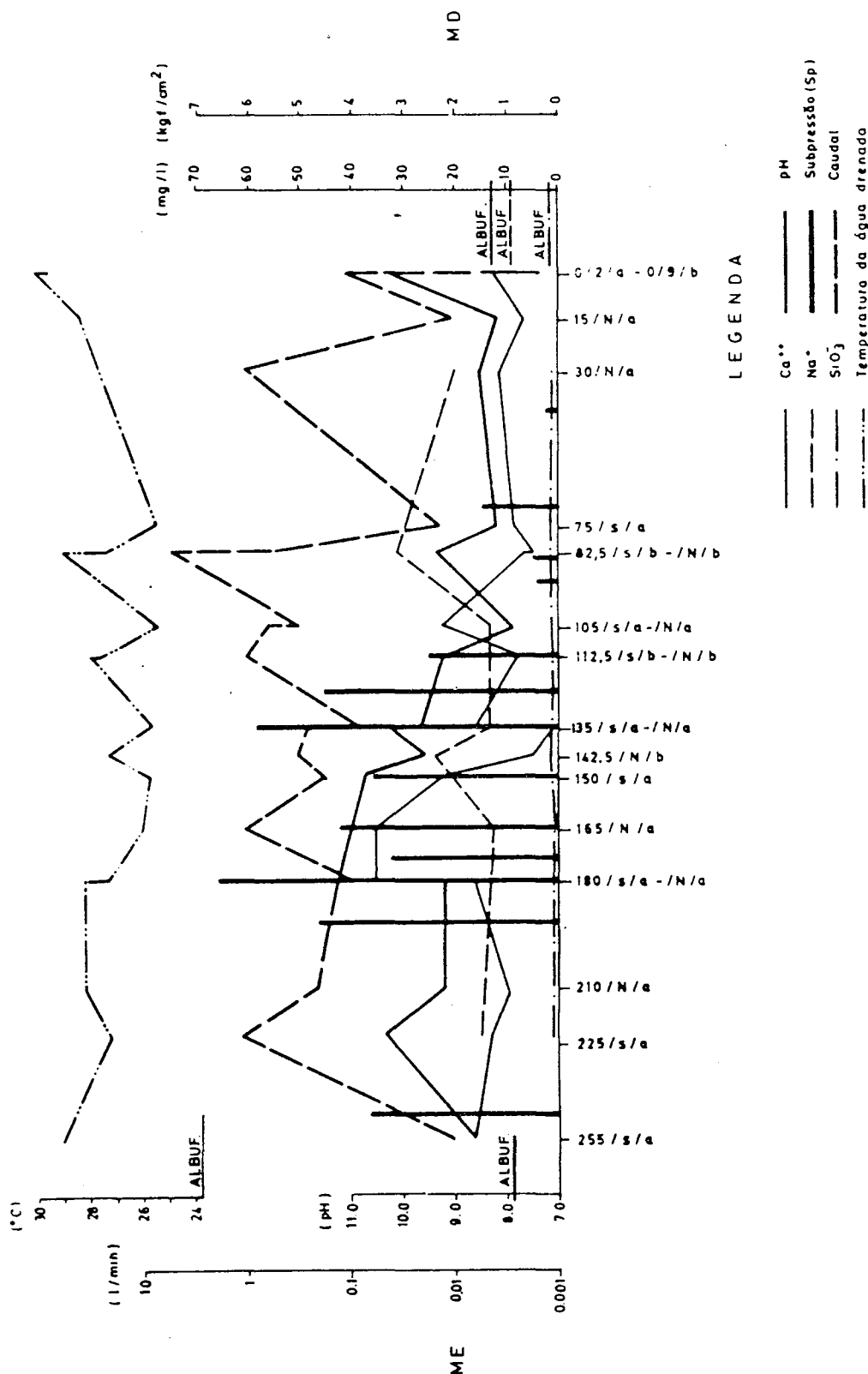


Fig 57 - Caracterização físico-química das águas drenadas pela galeria de fundação G145 em Novembro de 1985.

## 5.3 - Caracterização hidrogeoquímica da água percolada

### 5.3.1 - Parâmetros indicadores

O objectivo fundamental da caracterização quantitativa da composição química das águas, como inicialmente se referiu, é des-pistar os efeitos resultantes da sua percolação através do maciço de fundação, nomeadamente a eventual alteração química de que esteja a ser alvo a matriz rochosa e os produtos de injeção (cimentos) utilizados na consolidação e impermeabilização do maciço.

Por esse motivo, a análise basear-se-á sobretudo em parâmetros e índices geoquímicos que melhor permitam atingir esse objectivo.

No quadro 12 apresentam-se os valores de alguns índices e parâmetros geoquímicos construídos com base na composição química de rochas de natureza semelhante às do maciço de fundação da barragem (alínea 3.2.3.3 ) e com base na composição química das águas de percolação, pertencentes a drenos que foram objecto de análise química completa.

Apresentam-se, assim, os valores do pH e do índice de saturação (i), definido este como a diferença entre o pH medido e o pH de equilíbrio; este índice torna-se positivo para águas incrustantes e negativo para águas agressivas para o carbonato de cálcio.

O índice de desequilíbrio entre cloretados e alcalinos, mais impropriamente designado de índice de troca de bases (itb), é definido pela expressão:

$$itb = \frac{rCl - r(Na+K)}{rCl}$$

em que r significa que as concentrações estão expressas em miliequivalentes por litro (meq/l). Os valores deste índice, que podem ser positivos ou negativos, permitem verificar, de forma expedita, se se processou abrandamento ou endurecimento da água. No primeiro caso (abrandamento) os valores diminuem devido à troca iónica de cálcio e ou magnésio por sódio, e no segundo caso (endurecimento) aumentam.

Trata-se de um índice cuja utilidade é tanto maior quanto mais acentuado for o estado de alteração e também quanto mais intenso for o estado de divisão da matriz rochosa e, portanto, com grandes superfícies de contacto com as soluções percolantes.

Quadro 12 - Índices e parâmetros geoquímicos das rochas e das águas drenadas.

	pH	i (5)	itb (6)	rNa	rMg	rK	rSO <sub>4</sub>	
				rCa	rCa	rNa	rCL	
Granito (1)	-	-	-	0,30	0,68	0,83	-	
Gabro (2)	-	-	-	0,10	0,44	0,08	-	
Lamprôfiro (3)	-	-	-	0,34	1,71	1,22	-	
Clinquer (4)	-	-	-	0,003	0,03	1,28	-	
Água albufeira	7,90	-	-3,9	0,63	0,75	0,0125	3,44	
DRENOS DA GALERIA PERIFÉRICA	P7 - 1CS	10,92	2,82	-51,7	4,99	0,11	0,0011	5,60
	DGP22	11,00	3,30	-94,9	2,94	0,09	0,0013	5,00
	DGP12	10,70	2,20	-36,3	4,94	0,10	0,0015	3,87
	DGP10	11,00	3,20	-85,6	2,66	0,06	0,0014	5,20
	DGP2	11,20	3,60	-29,5	0,78	0,08	0,0025	4,15
	P4 - 1CS	11,30	3,80	-46,0	0,97	0,09	0,0016	3,90
	P4 - 1CI	9,15	1,35	-18,8	1,26	1,00	0,0143	2,67
	DGP3	9,15	1,05	-0,9	0,44	0,57	0,0041	0,42
	DGP7	11,00	3,10	-26,6	0,65	0,04	0,0026	5,33
	DGP175,5A	10,20	1,70	-13,1	0,91	0,37	0,0051	4,67
	DGP13	11,55	4,45	-14,5	1,04	0,04	0,0031	1,25
	DGP17	10,95	3,05	-52,5	3,30	0,08	0,0011	3,18
	P3 - 1CS	10,80	2,70	-18,3	2,85	0,11	0,0019	1,84
	P3 - 1CM	10,45	2,05	-38,7	2,29	0,17	0,0061	3,10
	DGP283,5A	7,80	-0,60	-9,2	0,75	0,44	0,0074	6,23
DRENOS DA G145	225/S/A	10,35	1,90	-85,0	1,02	0,12	0,0077	22,10
	165/N/A	10,95	3,15	-71,9	0,31	0,04	0,0091	35,00
	142,5/N/B	9,55	0,65	-8,9	4,38	1,00	0,0067	36,60
	135/N/A	10,25	1,85	-5,6	0,75	0,10	0,0150	1,78
	105/N/A	7,85	-0,40	-5,5	0,63	0,42	0,0133	0,57
	82,5/N/B	9,35	0,65	-1,8	4,31	1,00	0,0043	1,00
	30/N/A	8,55	0	-7,3	1,56	0,29	0,0069	1,84

(1) Charnoquito de Madras

(2) Lacólito de Cuillin

(3) Mineto de Osann

(4) Clinquer de cimento experimental (LNEC 1978)

(5) pH - pH equilíbrio

(6) Índice de desequilíbrio entre cloretos e alcalis

Além do mais, como o ião cloro apresenta geralmente grande estabilidade, pode este índice servir como indicador das condições de alteração do maciço atravessado. As alterações mais significativas da concentração em cloro ( $\text{Cl}^-$ ) resultarão do contacto da água de percolação com a cloroapatite que ocorre, com baixa frequência, no granito gneissico regional, constituinte maioritário do maciço de fundação.

Os restantes parâmetros apresentados ( $r\text{Na}/r\text{Ca}$ ,  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ ,  $r\text{K}/r\text{Na}$ ,  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ ) são relações entre concentrações iónicas destinadas a possibilitar a comparação com os tipos de rocha atravessada pela água de percolação.

Nas Fig. 58 e 59 apresentam-se sob forma gráfica os valores correspondentes aos índices e parâmetros descritos.

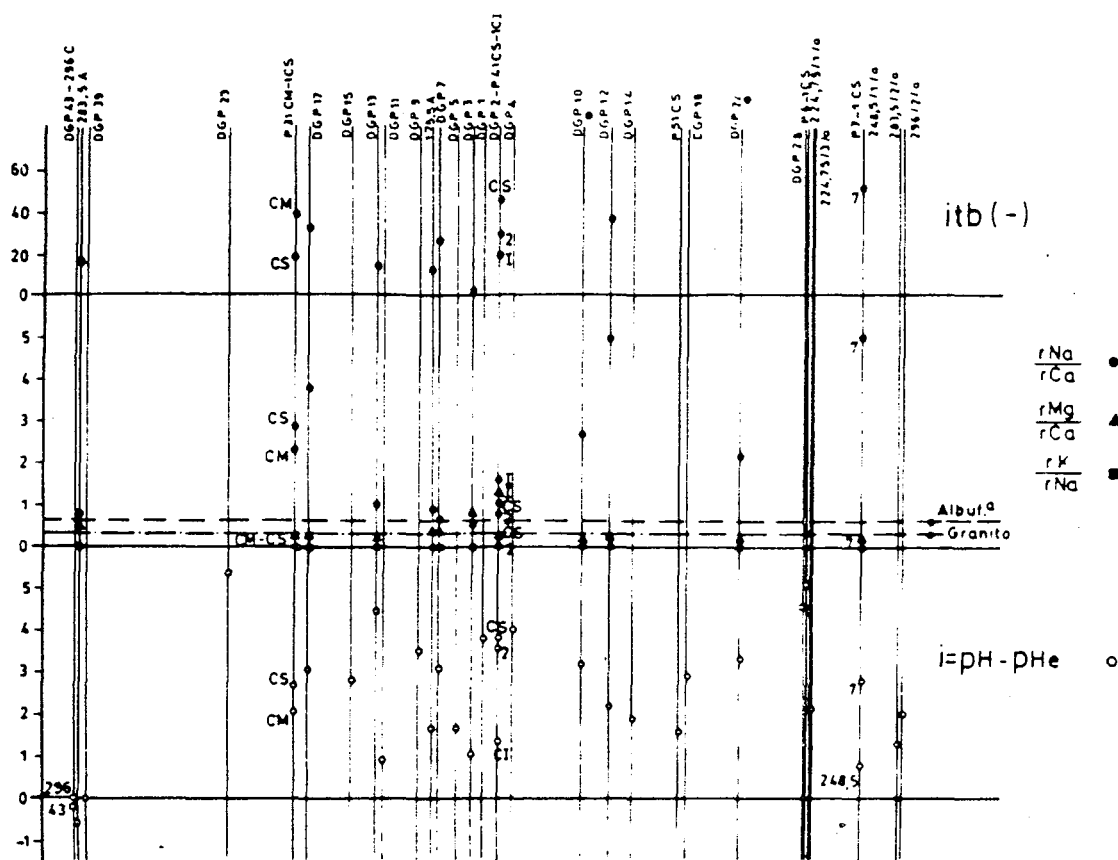


Fig. 58 - Representação gráfica dos índices geoquímicos determinados em águas drenadas pela galeria periférica em Novembro de 1985.

A sua análise individual apresenta-se nos pontos seguintes.



### 5.3.2 - Relações do pH com concentrações iónicas

O pH das águas drenadas analisadas é, salvo quatro casos em sessenta e nove análises efectuadas (D105/N/A - G145, DGP283.5/A-GP, 360/T/A - GD5 e 452/1/A - GD5), superior ao da água da albufeira.

Pretendeu-se estabelecer relações empíricas das concentrações de vários iões com os pH das respectivas soluções.

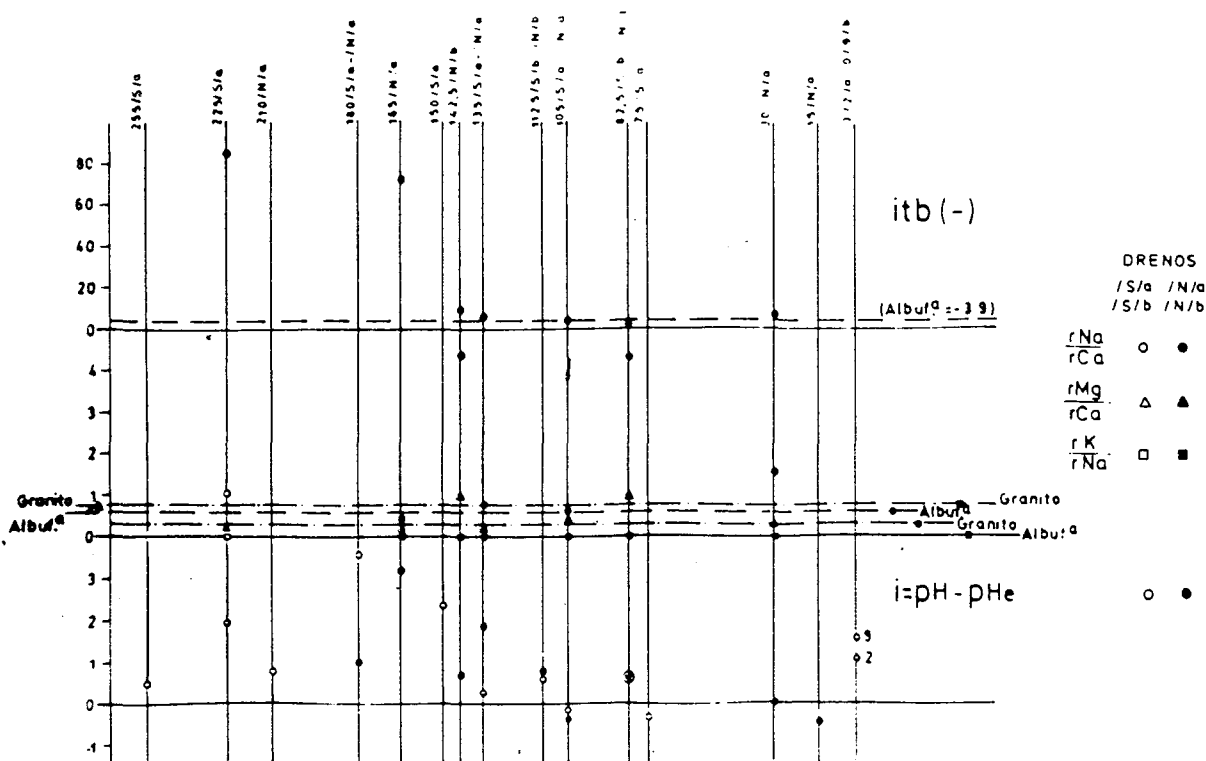


Fig. 59 - Representação gráfica dos índices geoquímicos determinados em águas drenadas pela galeria de fundação G145 em Novembro de 1985.

Na Fig. 60 apresenta-se o gráfico da distribuição dos iões cálcio e magnésio segundo a gama de valores de pH observados. Como se pode observar, as leis de distribuição são parabólicas. No caso do cálcio, o melhor ajustamento corresponde à consideração de regressões independentes para os domínios de pH inferiores e superiores a dez. Na mesma figura representa-se a curva de equilíbrio do cálcio para soluções ideais (Lladó 1970), com a pressão e a temperatura controladas para uma atmosfera e 25°C, respectivamente. Constata-se, como adiante se voltará a referir na análise do índice de saturação, que a maioria das águas se encontra, para aquelas condições ideais, na zona de precipitação do cálcio.

Como a quase totalidade dos valores de pH são superiores a 8,3, existe uma correlação positiva e elevada entre aqueles valores e a concentração de oxidrilião ( $\text{OH}^-$ ) nas respectivas águas ( $\text{pH} = 0,0057 \times \text{OH}^- + 10,6$ ;  $\text{corr} = 0,8$ ).

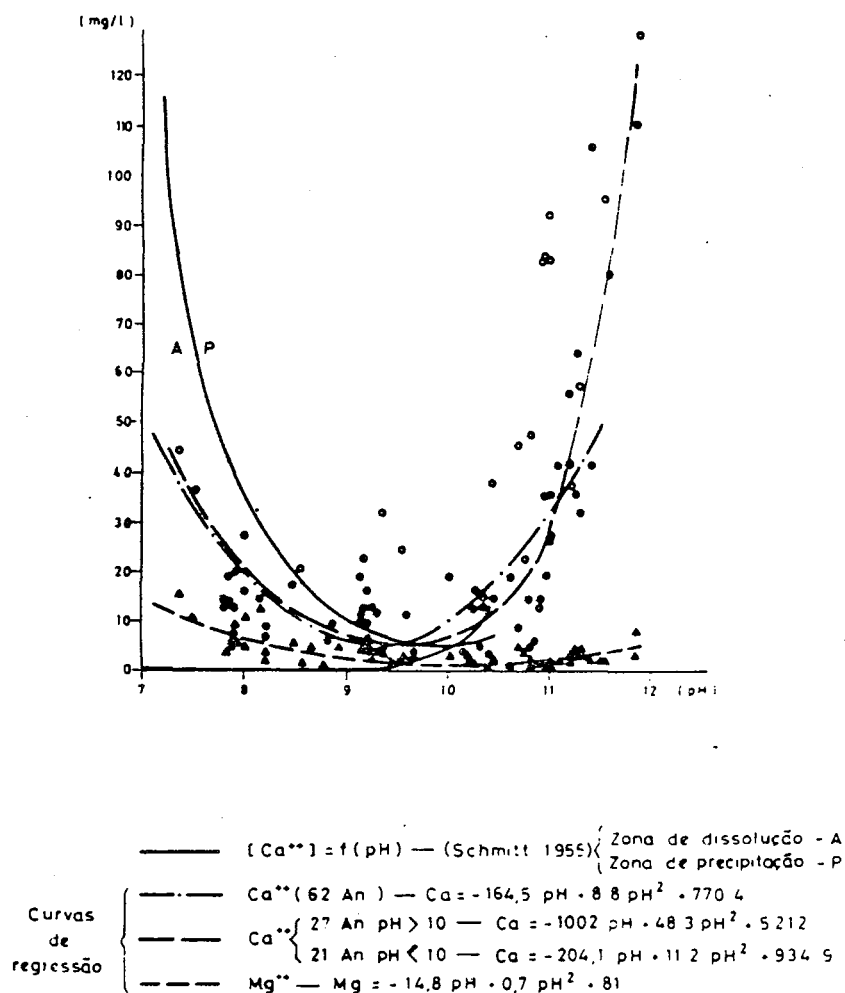


Fig. 60 - Curvas de dissolução do cálcio e do magnésio em função do pH.

Na Fig. 61 apresenta-se, também, a distribuição da sílica ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ), do sódio ( $\text{Na}^+$ ) e do cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em função do pH.

Trata-se de um gráfico extremamente elucidativo da forma como evoluem as concentrações daqueles elementos com o pH. Daqui se

poderá, em princípio, admitir que soluções de pH mais elevado correspondem a águas que percolam em zonas do maciço de maior alterabilidade, com maior aptidão, portanto, para cedência de iões à água.

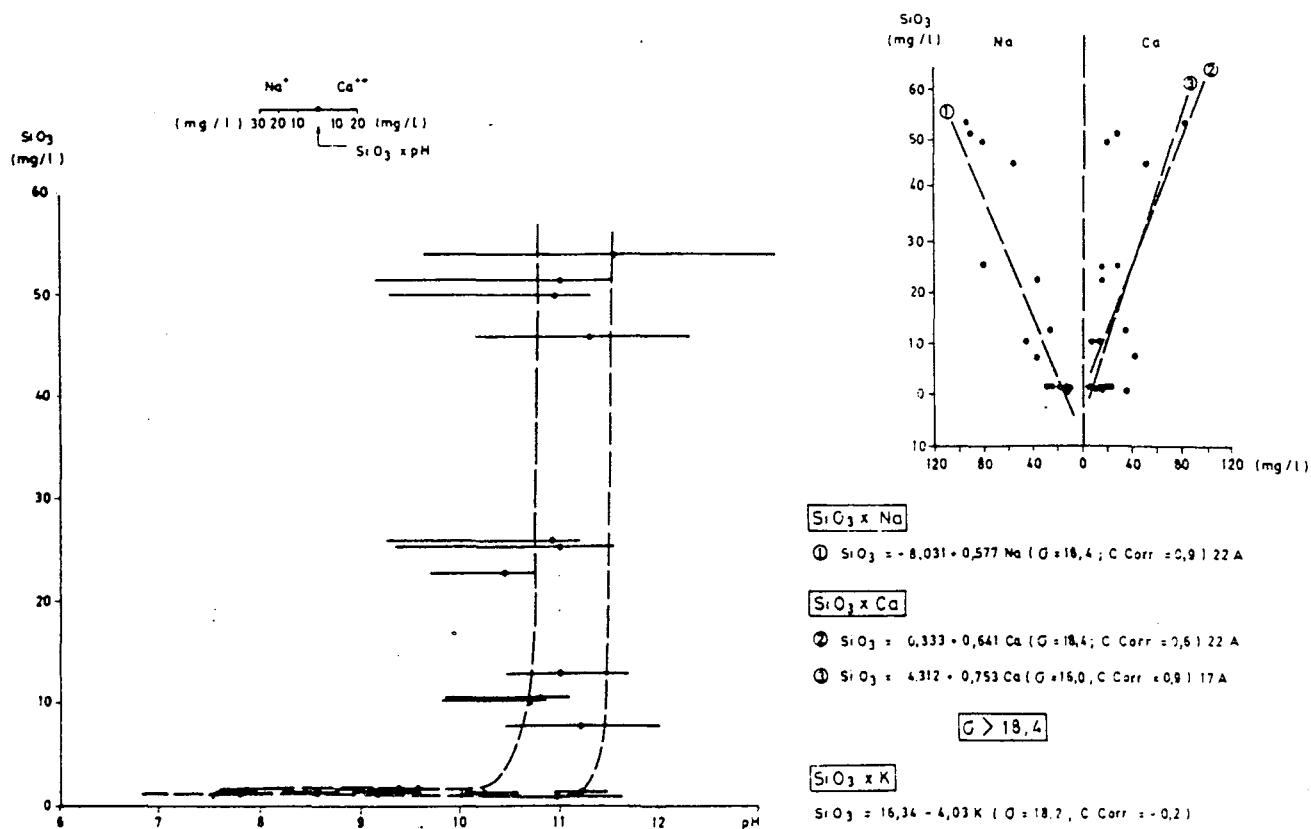


Fig. 61 - Relações entre as concentrações de sílica, cálcio e sódio e o pH.

Em relação à sílica, verifica-se que a sua concentração para valores de pH inferiores a 10,5 se apresenta pouco variável e de valor reduzido. De facto, experiências de laboratório (Krauskopf, 1972), em ambiente controlado ( $P = 1 \text{ atm}$ ;  $\text{Temp} = 25^\circ\text{C}$ ), apontam para solubilidade constante de  $6 \text{ mg.l}^{-1}$  para o quartzo e de  $115 \text{ mg.l}^{-1}$  para a sílica amorfa em soluções de  $\text{pH} < 9$ , crescendo exponencialmente para valores de pH superiores (Fig. 3).

Em relação à alumina ( $Al_2O_3$ ), cujas concentrações não foram determinadas, a sua solubilidade é muito reduzida em soluções cujo pH se situe entre 4,5 e 8, crescendo enormemente para valores de pH fora daquele domínio (Carroll, 1970)(Fig. 3). Os valores de pH medidos na maioria das águas analisadas é, como se disse anteriormente, superior a 8. Esta situação, só por si e também pela natureza dos materiais atravessados (granitos e cimentos-betão), poderá indiciar a existência de alumínio em solução, que não foi quantificado por dificuldades laboratoriais.

Nota-se uma relação mais forte entre os teores de sódio e de sílica (coef. de correlação = 0,9) do que entre os teores de cálcio e os de sílica (coef. de correlação = 0,6). No entanto, excluindo-se numa segunda regressão sílica-cálcio as águas dos drenos que, na primeira regressão, apresentavam desvios, em relação aos valores calculados, superiores a um desvio padrão ( $\sigma = 18,4$ ), obteve-se um coeficiente de correlação idêntico ao obtido para a regressão sílica-sódio (coef. de correlação = 0,9).

Por outro lado, regressão efectuada entre o potássio e a sílica ( $SiO_2 \cdot xK$ ) forneceu um baixo coeficiente de correlação (-0.2).

Apesar da não quantificação da alumina, estes resultados, só por si, apontam para o facto de ser o cimento das caldas de injeção do maciço de fundação e/ou do betão da base da barragem e os minerais da rocha de fundação, de natureza silicatada sódica (piroxenas, biotite e plagioclases), os principais contribuintes de iões para a água de percolação.

A Fig. 62 foi elaborada com base nos elementos recolhidos na bibliografia (Fig. 3)(Carroll 1970; Krauskopf 1972) e nos resultados das análises da água percolada, anteriormente apresentados nas Fig. 56, 57 e 61.

Pretendeu-se através da conjugação dos vários elementos conhecer a capacidade de alteração (alterabilidade) do conjunto base da barragem - maciço de fundação em contacto com a água de percolação e zonar diferencialmente essa capacidade.

Utilizou-se, para o efeito, o valor do pH, dada a sua potencialidade para o despiste das situações de solubilização de algumas substâncias (gráficos A e B da Fig. 62), como ficou atrás demonstrado.

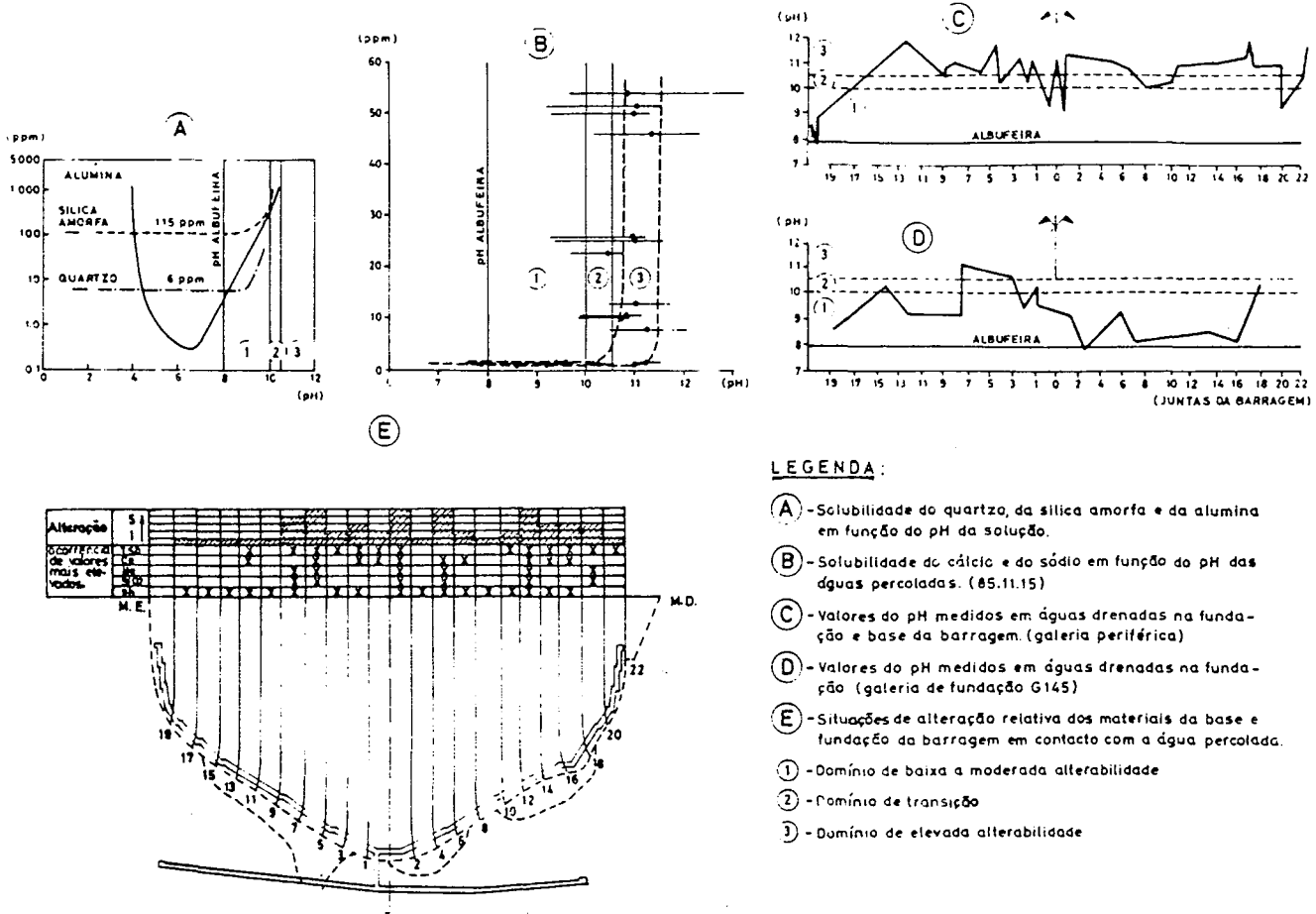


Fig. 62 - Zonamento das condições de alteração do maciço de fundação relativas a Novembro de 1985.

Estabeleceram-se, assim, dois domínios de alterabilidade e um de transição: i) alterabilidade baixa a moderada, a que correspondem zonas atravessadas por águas de pH inferior a 10 e superior a 8 (pH da água da albufeira); ii) alterabilidade elevada, a que correspondem zonas atravessadas por água de pH superior a 10,5; e iii) o domínio de transição a que correspondem águas com pH entre 10 e 10,5.

Como se pode observar (gráfico C da Fig. 62), na galeria periférica praticamente todas as águas analisadas possuem pH acima do limite inferior do domínio de transição, e a grande maioria situa-se dentro do domínio de alterabilidade elevada (pH > 10,5). Os valores mais baixos ocorrem nas zonas dos blocos entre as juntas 0 a 5 (margem esquerda) e 6 a 10 (margem direita).

Por seu turno, na galeria de fundação G 145 (gráfico D da Fig. 62) a quase totalidade dos valores de pH medidos situam-se abaixo do limite mínimo do domínio de transição (pH=10), com excepção da LNEC-Proc. 43/13/9208

zona da fundação alinhada com os blocos localizados entre as juntas 3 a 7 ( $\text{pH} > 10,5$ ) e entre as juntas 13 a 15 ( $10 < \text{pH} < 10,5$ ). Quer dizer que, exceptuando aquela zona do maciço de fundação (juntas 3 a 7) com um grau de alterabilidade elevado, o restante maciço de fundação atravessado pelas águas afluentes à galeria de fundação G 145 apresenta baixa alterabilidade.

É naturalmente evidente que a capacidade de alteração (alterabilidade) assim definida está dependente dos factores intrínsecos (inerentes aos materiais - meio) e extrínsecos (inerentes ao agente da alteração - água de percolação) prevalecentes na época em que foram realizadas as colheitas e análises da água. No entanto, dada a evolução pouco significativa observada nas características da água da albufeira (alínea 5.1) ao longo dos dez anos anteriores, admite-se que no futuro próximo, e a médio prazo, aqueles factores não se alterem também. Se assim for, a capacidade de alteração dos materiais também não evoluirá significativamente durante esse período.

### 5.3.3 - Índice de saturação (i)

Nas águas vertidas pelo sistema de drenagem da galeria periférica, os valores deste índice (alíneas 2.2.2 e 5.3.1) são de um modo geral elevados e indicam tratar-se de água com capacidade incrustante. Exceptuam-se as águas dos drenos DGP 283,5/A e DGP 43, em que se verifica ligeira capacidade dissolvente, e as águas dos drenos DGP 296/C e DGP 39, que são equilibrantes. A maior parte dos valores observados (85%) são superiores a 1 e inferiores a 5,5, com um valor médio global da ordem de 2,47 e um desvio padrão de 1,51. No quadro 12 indicam-se somente os valores correspondentes às águas cuja análise química foi completa e serviram para a determinação dos restantes parâmetros indicadores.

Trata-se, portanto, de águas que apresentam tendência para precipitação de sais, nomeadamente de cálcio. Este facto, na realidade, tem sido constatado através dos depósitos volumosos de carbonato de cálcio precipitados ao longo do percurso das águas nas paredes e pisos da galeria periférica. Convém salientar, no entanto, que grande quantidade do carbonato de cálcio depositado provém de águas carregadas de hidróxido de cálcio que atravessam juntas e fissuras do corpo da barragem.

Nas águas afluentes ao sistema de drenagem da galeria de fundação (G145) os valores observados são mais baixos do que na galeria periférica. Os mais elevados ocorrem em drenos situados na fundação do lado da margem esquerda (Fig. 59). Daí que se registem também os depósitos mais volumosos de carbonato de cálcio ao longo deste sector da galeria de fundação. No sector da margem direita, algumas das águas de drenagem analisadas revelam, ainda, capacidade agressiva para o carbonato de cálcio (drenos 105/N/A, 105/S/A, 75/S/A e 15/N/A).

#### 5.3.4 - Índice de desequilíbrio entre cloretados e alcalinos (itb)

Na galeria periférica os valores deste índice nas águas drenadas analisadas são todos superiores, em valor absoluto, ao da água da albufeira.

Como se trata de valores negativos, o que acontece geralmente em formações graníticas, quer dizer que houve abrandamento (aumento relativo do teor de sódio) da água percolada em relação à água da albufeira. Relativamente à galeria periférica (Fig. 58) esse abrandamento é aparentemente menor na zona do fundo do vale sobre a margem esquerda, crescendo os valores no sentido do aumento de cota das margens.

É aparente uma correlação positiva, embora não muito pronunciada, entre este índice e o caudal drenado pelos correspondentes drenos da galeria periférica ( $itb = 7,8 Q - 45,8$ ;  $corr = 0,5$ ). Verifica-se, deste modo, uma diminuição do abrandamento para caudais mais elevados. Este facto poderá querer dizer que os caudais mais elevados se processam através de um número mais reduzido de fissuras sem preenchimento, com trajecto curto ou com velocidades elevadas, entre a zona de infiltração e o dreno, não resultando, portanto, de uma rede numerosa de fissuras condutoras ou com preenchimento.

Na galeria de fundação (G 145) os valores deste índice são muito pequenos, e decrescem em valor absoluto da margem esquerda para a margem direita (Fig. 59). Nesta galeria nota-se uma correlação muito mais acentuada e negativa entre o itb e o caudal drenado ( $itb = - 72,7 Q + 38$ ;  $corr = - 0,8$ ) ao contrário do que acontecia na galeria periférica. Portanto, em princípio, o valor do índice baixa para caudais mais elevados, o que poderá indiciar um abran-

damento maior. Esse facto poderá levar a admitir percursos mais extensos para esses fluxos percolantes e, ou, resultantes de uma maior densidade da rede de fissuras condutoras ou, ainda, do contacto com preenchimentos naturais ou com produtos da alteração das rochas atravessadas. Dada a posição da rede de drenagem (Fig. 13) é possível a ocorrência das duas situações. Como se pode deduzir da figura, o percurso percorrido pela água infiltrada a partir da albufeira até atingir a rede de drenagem da G145 é maior do que o percorrido para atingir a rede de drenagem da galeria periférica.

#### 5.3.5 - Relações iónicas ( $r_{Na}/r_{Ca}$ , $r_{Mg}/r_{Ca}$ , $r_{K}/r_{Na}$ e $r_{SO_4}/r_{Cl}$ )

Em geral, nas águas de circulação subterrânea em rochas pouco alteradas, onde não estão presentes minerais de argila, os quais fornecem grande poder de quimioabsorção, conforme referido atrás, os valores destas relações obtidas para a água percolante aproximam-se das da rocha atravessada. A existência de outros produtos não naturais, como por exemplo os cimentos da injeção ou o betão da base da barragem, pode alterar o sentido desta proposição

No quadro 12 indicam-se as relações iónicas para rochas do tipo das existentes na fundação da barragem de Cahora-Bassa e, ainda, de um clínquer de cimento experimental estudado para esta barragem (LNEC 1978). Estes valores têm somente um valor comparativo, na medida em que não correspondem exactamente à composição dos materiais por onde percola a água, embora lhes sejam próximos.

A rocha de fundação é, na quase totalidade, de natureza granítica, atravessada por filões de lamprófiro.

A relação entre as concentrações de sódio e de cálcio ( $r_{Na}/r_{Ca}$ ) apresenta valores sempre superiores às da rocha, com excepção da água do dreno 165/N/A da galeria de fundação, cujo valor 0,31 é semelhante ao das rochas (granito = 0,30; lamprófiro = 0,34). Para além dos fenómenos atrás descritos de troca iónica, resulta clara a incorporação de sódio na água de circulação resultante da hidrólise dos silicatos que maioritariamente constituem a rocha: os feldspatos, e em especial as plagioclases (albite e oligoclase).

Os valores desta relação são mais baixos nas águas drenadas na zona do fundo do vale, existindo uma correlação negativa em relação aos respectivos caudais, mais acentuada na galeria periférica do que na galeria de fundação. Esta situação aponta, mais uma vez,



para que sejam condições de fluxo com velocidade elevada e, ou, pequenas extensões de percurso as determinantes dos caudais mais elevados. Donde resulta o facto de a percolação mais intensa nesta zona se ficar a dever mais a um número reduzido de fissuras de maior condutividade hidráulica do que a um número elevado de fissuras de menor condutividade hidráulica.

A relação entre as concentrações de magnésio e de cálcio ( $rMg/rCa$ ) são, na generalidade, inferiores aos valores admitidos para as rochas atravessadas. Exceptuam-se os casos das águas drenadas pelos drenos 142,5/N/B e 82,5/N/B da galeria de fundação e pelo piezómetro P4-1CI da galeria periférica, cujos valores se situam entre o do granito (0,68) e o do lamprófiro (1,71).

O valor desta relação na água da albufeira é também superior ao do granito. Constata-se, assim, ter havido uma diminuição generalizada da concentração em magnésio nas águas de percolação. Este facto será, certamente, mais um indício da existência de fenómenos de troca iónica ao longo do caminho percorrido pela água. Na realidade, o catião com maior aptidão para ser fixado em fenómenos de troca iónica a seguir ao cálcio é o magnésio.

Na galeria periférica os valores mais elevados ocorrem na zona do fundo do vale, precisamente em zonas que temos vindo a constatar como de mais elevada drenância, verificando-se uma muito fraca correlação positiva com os caudais drenados. Na galeria de fundação essa correlação é mais acentuada e negativa. De facto, as velocidades mais elevadas; ou os percursos menores em fendas sem preenchimento, conduzem a tempos de contacto menores com a matriz rochosa o que faz, obviamente, diminuir esses fenómenos de troca iónica (consequentemente a persistência de valores mais elevados daquela relação). Aliás, em alíneas anteriores esta situação foi já evidenciada pela análise dos respectivos índices.

A relação entre os iões potássio e sódio ( $rK/rNa$ ) poderia à primeira vista ser considerada como uma relação parental importante, já que o granito atravessado é principalmente constituído, para além do quartzo, por feldspatos predominantemente alcalinos (ortóclase, microclina, micropertite e albite). Porém, o que se verifica é que os valores desta relação observados nas águas drenadas são substancialmente inferiores ao de qualquer das rochas consideradas (granito, lamprófiro e gabro) e mesmo do clínquer do cimento.

Para além do facto de que os minerais em que os silicatos de alumínio e potássio são predominantes (ortoclase e microclina), e portanto mais resistentes à alteração do que os que possuem sódio na sua composição (principalmente micropertite, albite e oligoclase), estão os fenómenos já descritos de fixação iónica. O potássio é fixado mais facilmente por fenómenos de quimioabsorção do que o sódio.

Tal como acontecia com a relação anterior, os valores mais elevados observam-se para águas de drenos com maiores caudais, embora se observe uma correlação muito fraca entre estes dois parâmetros (relação  $rK/rNa$  e caudal, positiva na galeria periférica e negativa na galeria de fundação).

As relações entre as concentrações de sulfato e de cloro ( $rSO_4/rCl$ ) foram calculadas com o objectivo de identificar e localizar possíveis fenómenos de decomposição microbiana de matéria orgânica no fundo da albufeira ou de atravessamento de zonas da fundação com particular enriquecimento em enxofre. Isto apesar de, à partida, se admitir que a composição mineralógica das rochas atravessadas não é favorável à ocorrência de minerais contendo enxofre.

Os valores observados nas águas drenadas pela galeria periférica são próximos do da água da albufeira, com ligeiras variações para mais e para menos. Os valores encontrados para o ferro, sob a forma de hidróxido, são tão insignificantes que não é possível estabelecer qualquer relação de dependência entre o ferro dissolvido e iões de enxofre. Por outro lado, não foram detectados sulfuretos nas águas desta galeria, o que até certo ponto também não seria lógico em face do meio oxidante que se julga ser prevalente, apesar de não ter sido determinado o seu potencial redox. Em princípio, e admitindo esta hipótese como válida, os sulfuretos ocorreriam em forma oxidada, originando sulfatos, situação que se julga ser a existente.

Na galeria de fundação (G145), dos sete drenos analisados, quatro apresentam uma relação ( $rSO_4/rCl$ ) bastante baixa, enquanto que os restantes três apresentam valores bastante elevados. Apesar do número de casos analisados ser reduzido, e de não ter sido determinado o potencial redox da solução nem a eventual existência de sulfuretos, julgamos também existirem condições de meio oxidante, aliás confirmadas pelo estado de deterioração das tubagens de

ferro.

A variação acentuada dos valores encontrados poderá ficar-se a dever ao ciclo de vida dos fungos que proliferam junto à saída de alguns drenos (Upsher 1968; Zajic 1971). Os valores mais elevados registam-se precisamente em drenos onde o desenvolvimento daqueles fungos é maior e estes se encontram numa fase do ciclo de vida correspondente ao envelhecimento e morte. Na realidade, é na galeria de fundação que se encontram as colónias de fungos mais desenvolvidas.

#### 5.4 - Taxas de arraste e de precipitação de sais em solução

Por taxas de dissolução pretendemos designar o valor em peso de alguns sais dissolvidos e arrastados para o exterior do maciço pela água de percolação, que sai através da rede de drenagem, num determinado intervalo de tempo.

A sua quantificação baseia-se na consideração do balanço de duas variáveis importantes. São elas os volumes de águas drenados e as concentrações de sais dissolvidos nessas águas. É evidente que os balanços feitos desta forma pecam, geralmente, por defeito, já que não são considerados os volumes totais da água escoada através do maciço de fundação (águas não captadas pela rede de drenagem) nem a quantidade total de sais dissolvidos. Por esse motivo, os volumes totais de sais dissolvidos e arrastados será, obviamente, mais elevado do que o que se possa deduzir dos cálculos efectuados.

Desta forma, a taxa de arraste resulta da aplicação da seguinte expressão a qualquer ião, grupos de iões ou de sais desses iões:

$$T = (I - A) \times Q,$$

em que I e A são as concentrações desses iões na água drenada e na água da albufeira, respectivamente, e Q é o caudal. Assim, um valor positivo indicará arraste em solução para o exterior do dreno, e conseqüentemente da fundação, e um valor negativo indicará a precipitação antes da saída da água para o exterior do dreno, e, conseqüentemente, no interior deste ou do maciço de fundação.

Procurou-se estabelecer as relações entre as taxas individuais correspondentes aos drenos analisados, relativas ao total de sais dissolvidos (contabilizado através do resíduo sêco a 180°C), ao cálcio e ao sódio dissolvidos e os respectivos caudais medidos.

O resíduo sêco a 180°C (RS) representa o total de sais dissolvidos na água (TSD) menos cerca de metade dos bicarbonatos (CO<sub>3</sub> H<sup>-</sup>) que se volatilizam a essas temperaturas. Optou-se pela utilização desta variável porque nem todos os drenos analisados foram objecto de quantificação do TSD por análise química completa. Ao adoptar este procedimento está-se, obviamente, a fazer um balanço por defeito e, conseqüentemente, a determinar taxas mais moderadas do que as reais.

Para os drenos em que foram determinados o TSD e o RS obteve-se a seguinte relação entre estas duas grandezas: TSD = 0,89 RS + 19,73 (coef.de correlação = 0,94; 23 amostras).

Nas Fig. 63, 64 e 65 dispõem-se, em papel bilogarítmico, os conjuntos de pontos referentes àquelas três grandezas. Obtiveram-se correlações elevadas entre qualquer delas e o caudal drenado, para funções de regressão logarítmica.

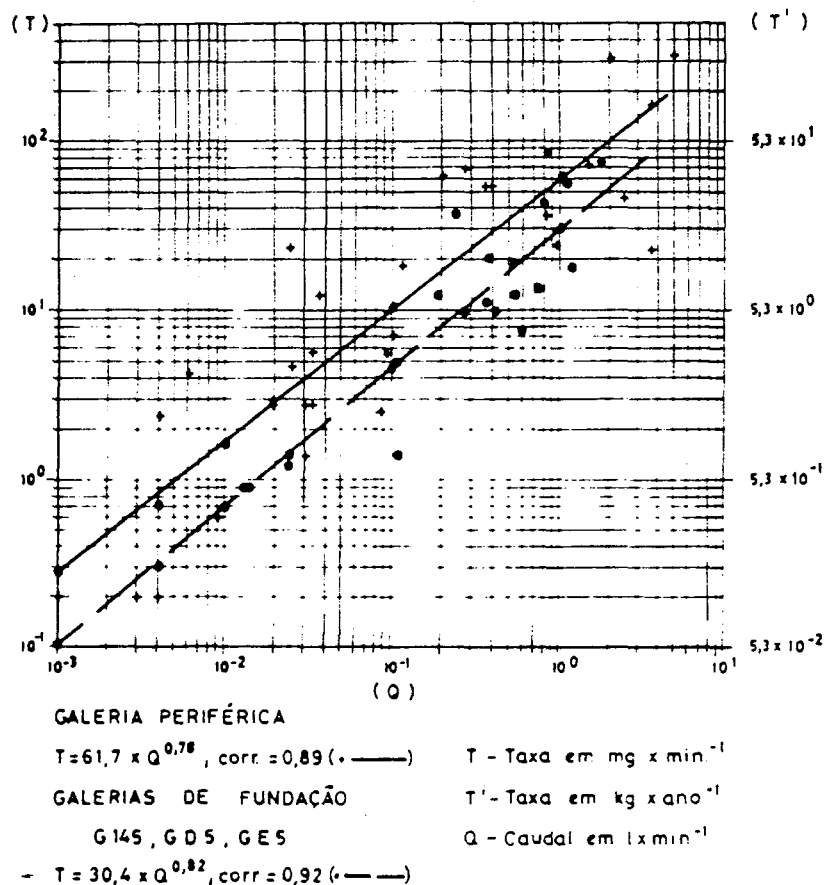


Fig. 63 - Taxas de dissolução para o TSD.

No caso do total de sais dissolvidos (Fig. 63), os drenos da galeria periférica apresentam taxas ligeiramente mais elevadas do que os das restantes galerias de fundação. Para caudais de 1 l. min<sup>-1</sup> registrar-se-iam, assim, em média, taxas da ordem de 32 kg.ano<sup>-1</sup> e de 16 kg.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. A maior parte dos drenos debitam caudais com valores inferiores a 1 l.min<sup>-1</sup>, como se pode observar, o que reduz, naturalmente, as taxas de dissolução e arraste.

Relativamente ao cálcio dissolvido (Fig. 64), existem drenos cujas águas registam um acréscimo de concentração em relação á água da albufeira, enquanto outros registam um decréscimo, a que já nos referimos em análise qualitativa anterior (alínea 5.2). Essa si-

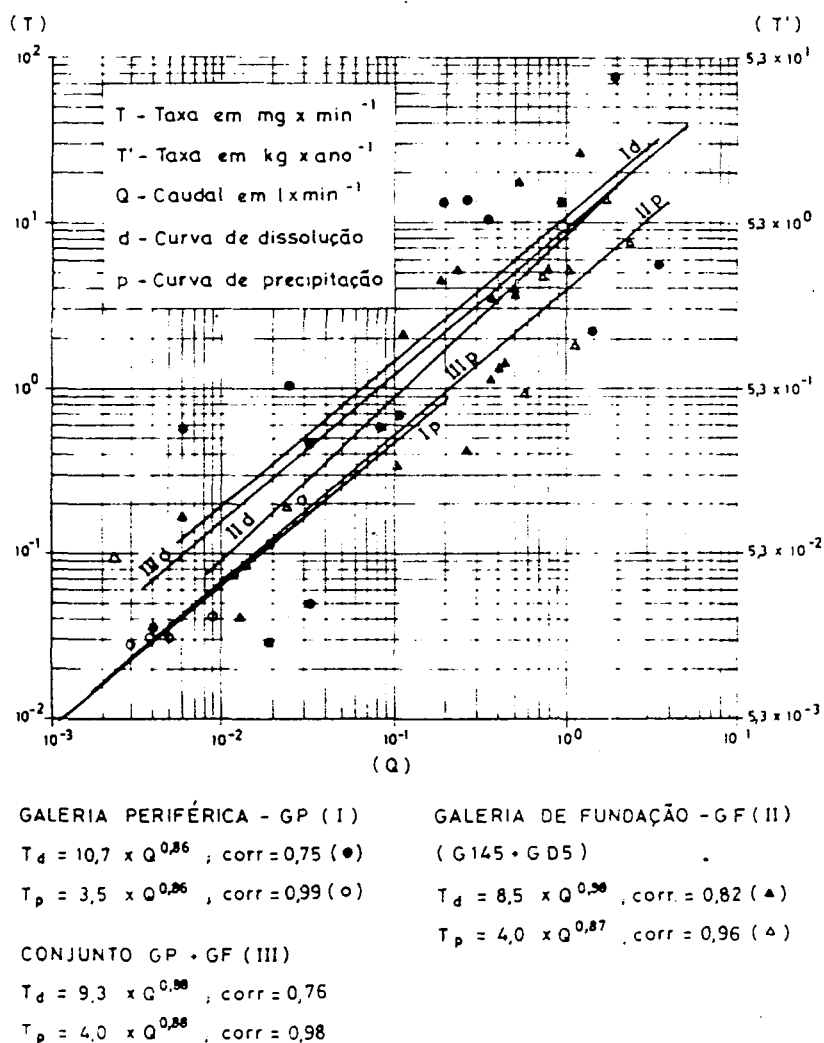


Fig. 64 - Taxas de dissolução e de precipitação para o cálcio.

tuação conduz-nos á consideração de taxas de dissolução e arraste e de taxas de precipitação. O que se verifica é que estas taxas apresentam curvas com andamento semelhante, com valores, porém, mais elevados para as situações de dissolução do que de precipitação.

Na galeria periférica registam-se os maiores valores da taxa de dissolução, muito próximos dos valores da taxa das galerias de fundação, apresentando esta última valores iguais aos da taxa do conjunto de todos os drenos. Por outro lado, a taxa de precipitação na galeria periférica é ligeiramente inferior à das galerias de fundação, e coincide por sua vez, também, com a do total de drenos. É de salientar, ainda, o facto de que na galeria periférica são os drenos geralmente de menor caudal que apresentam tendência para precipitar o cálcio antes da saída da água do interior do dreno, enquanto que nas galerias de fundação não existe diferenciação de tendências evidente em função dos débitos dos drenos. As correlações entre as taxas e os caudais são mais fortes nas situações de precipitação do que de arraste.

É, assim, evidente a existência de um diferencial positivo entre os valores do cálcio dissolvido e arrastado para o exterior da rede de drenagem e os valores do cálcio que precipita no interior do maciço ou da rede de drenagem. Considerando o conjunto de drenos analisados em todas as galerias, o valor desse diferencial é, para um caudal de  $1 \text{ l.min}^{-1}$ , da ordem de  $2,6 \text{ kg.ano}^{-1}$ .

Analisando, agora, as taxas referentes ao sódio dissolvido (Fig. 65), verifica-se que o conjunto de drenos analisados é muito restrito. Apesar disso, observa-se que as curvas determinadas para cada galeria apresentam correlações baixas. Mas se trocarmos entre as galerias de drenagem e de fundação alguns drenos verificamos que as correlações aumentam substancialmente.

Na realidade, se ao conjunto de águas analisadas na galeria periférica, em cuja regressão se obteve um índice de correlação de 0,85, se retirarem as correspondentes aos drenos DGP175,5/A e DGP283,5/A e ao piezómetro P4-1CI e se juntar a do dreno D82,5/N/B da galeria de fundação G145, o índice de correlação da regressão sobe para 0,95. Da mesma forma, se ao conjunto da G145 retirarmos as dos drenos D30/N/A, D82,5/N/B e D142,5/N/B e juntarmos as dos drenos DGP175,5/A e DGP283,5/A e do piezómetro P4-1CI da galeria periférica, o índice de correlação da regressão referente a esta galeria sobe significativamente de 0,42 para 0,99.

Com estas permutas, no primeiro caso (galeria periférica) a taxa sobe, enquanto que no segundo (galeria de fundação G145) a taxa desce. Este facto poderá querer significar que as condições de fluxo e de drenagem de alguns desses drenos se identificam com as dos demais drenos pertencentes às galerias em que foram incluídos na permuta, nomeadamente as condições de percurso e de pressão.

As curvas assim obtidas apontam para taxas de dissolução e arraste para o exterior da rede de drenagem maiores nos drenos da galeria periférica do que nos das galerias de fundação.

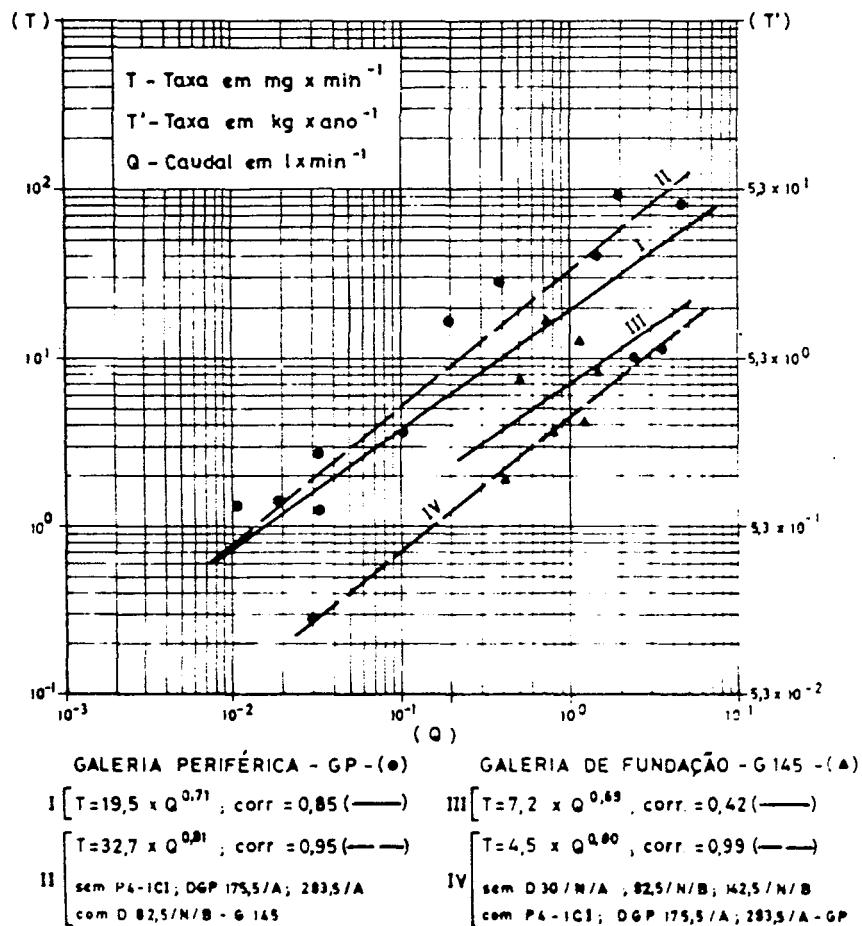


Fig. 65 - Taxas de dissolução para o sódio.

No caso das regressões com correlação mais elevada (obtidas com as referidas trocas de drenos), para um caudal de  $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , deduzem-se taxas da ordem de  $17,5 \text{ kg} \cdot \text{ano}^{-1}$  para os drenos da galeria periférica e de  $2,4 \text{ kg} \cdot \text{ano}^{-1}$  para os drenos das galerias de fundação.

De facto, os caudais drenados registados em Novembro de 1985

são baixos e apresentam valores médios com variações (que se depreendem dos desvios padrão) da seguinte ordem de grandeza: na galeria periférica, incluindo no mesmo conjunto drenos e piezómetros (90 casos), o valor do caudal médio é de 0,30 l/min, com um desvio padrão de 0,84 l/min; na galeria de fundação G145 (95 casos) o caudal médio é de 0,20 l/min, com um desvio padrão de 0,37 l/min; nas galerias de fundação da margem esquerda, GE5 e TGE5 (94 casos), o caudal médio é de 0,01 l/min, com um desvio padrão de 0,04 l/min; e nas galerias de fundação da margem direita, GD5 e TGD5 (155 casos), o caudal médio é de 0,08 l/min, com um desvio padrão de 0,32 l/min.

Analisando sumariamente a Fig. 63 e os valores dos caudais atrás referidos, os quais apresentam pequena variação anual, pode concluir-se que as taxas globais de arraste de sais (TSD) por dissolução através das redes de drenagem são, em média por dreno, da ordem de: 12 Kg/ano na galeria periférica; 4 Kg/ano na galeria de fundação G145; 0,4 Kg/ano nas galerias de fundação da margem esquerda GE5 e TGE5; e 2 Kg/ano nas galerias da margem direita GD5 e TGD5.

Quanto ao cálcio dissolvido, se da mesma forma analisarmos a Fig. 64, concluiremos que, por dreno e em média, ocorre a seguinte mobilidade para o exterior da rede de drenagem: arraste de 2 Kg/ano na galeria periférica; arraste de 0,6 Kg/ano na galeria de fundação G145; precipitação de 0,04 Kg/ano nas galerias de fundação da margem esquerda GE5 e TGE5; e arraste de 0,3 Kg/ano nas galerias de fundação da margem direita GD5 e TGD5.

Relativamente ao sódio arrastado em solução, e seguindo o mesmo raciocínio, obtêm-se taxas médias por dreno da seguinte ordem de grandeza: de 4,4 Kg/ano ou de 6,6 Kg/ano na galeria periférica, consoante se considere as regressões I ou II; de 1,2 Kg/ano ou de 0,6 Kg/ano na galeria de fundação G145, consoante se considere as regressões III ou IV.

Mas estes valores, por serem médios, são meramente indicadores. Se quisermos obter os reais valores globais relativos às quantidades de sais arrastados e ou precipitados, então teremos que recorrer ao seu cálculo por dreno e efectuar o respectivo somatório. Obteríamos, assim, os valores que se indicam no quadro 13.

São, no entanto, valores obtidos por defeito, como atrás se referiu, devido ao facto de se ter utilizado no seu cálculo o resi-



duo sêco a 180°C e não o total de sais dissolvidos.

No referido quadro apresenta-se o número de drenos e de piezómetros que debitavam caudal em Novembro de 1985 e a sua correspondente percentagem em relação ao total, o caudal total debitado por esses furos e as taxas de arraste de sais em solução para o exterior da rede de drenagem, deduzidas da Fig. 63.

A primeira constatação a fazer em relação aos valores de sais arrastados em solução calculados com base nos caudais médios, atrás referidos, é a de que são inferiores aos valores reais que se apresentam no quadro, e a sua diferença deriva do crescimento exponencial da taxa com o caudal. Essa diferença seria ainda maior se no cálculo dos caudais médios fossem somente considerados os furos (drenos e piezómetros) que debitam caudal mensurável, estes em número mais reduzido conforme se pode deduzir do quadro.

Quadro 13 - Valores dos caudais drenados e das taxas de arraste de sais em solução reportadas a Novembro de 1985.

Zona de drenagem	Nº de furos c/caudal	Caudal Total (l.min <sup>-1</sup> )	T (mg.min <sup>-1</sup> )	T' (Kg.ano <sup>-1</sup> )	T' média por dreno (Kg.ano <sup>-1</sup> )	
Drenos da G. Periférica	38	19,07	1038	546	797	14,4
Piezómetros da G. Periférica	14	8,37	477	251		17,9
Drenos da Galeria G 145	63	19,16	636	334	526	5,3
Drenos das Galerias GES+TGES	18	0,91	40	21		1,2
Drenos das Galerias GDS+TGDS	56	11,95	326	171		3,1
TOTAL	184	59,50	2497	1323		7,2

Estas discrepâncias de valores servem para mostrar que a análise destas situações deverá ser feita tendo em consideração as condições específicas de cada dreno, devendo o recurso a valores médios ser usado nestes estudos apenas como indicador ou na falta de valores individualizados.

A segunda constatação é a de que a galeria periférica, somente com 28% dos furos totais activos (drenos e piezómetros), é responsável por 60% do total de sais arrastados por ano em solução.

O caudal afluente à rede de drenagem da galeria periférica representava, também em Novembro de 1985, 59% do total do caudal debitado por si e pela galeria de fundação G145 e 46% do caudal debitado pelas redes de drenagem de todas as galerias em observação.

Estas percentagens sobem, naturalmente, quando o nível de água na albufeira sobe, na medida em que os drenos que maiores caudais debitam se situam nas cotas mais elevadas da galeria periférica. Este aspecto foi já referido quando da análise dos caudais drenados efectuada no Cap 4. Mas, em relação a essa situação, deve ter-se em atenção que os caudais afluentes a esses drenos de cota mais elevada são constituídos por água com percursos reduzidos e, como tal, com mineralização geralmente baixa, próxima da da água da albufeira. Por esse motivo, as suas taxas de arraste em solução serão relativamente reduzidas. Não quer isto dizer que, no entanto, dada a maior frequência de ciclos de impulso da estrutura sobre o maciço de fundação, com amplitude mais elevada nessa zona, não venham a registar-se maiores índices de deterioração mecânica e, consequentemente, taxas de arraste de partículas em suspensão mais elevadas.

As taxas de arraste em suspensão podem ser determinadas segundo os mesmos princípios definidos para as taxas de arraste em solução. Neste caso, na expressão  $T = (I-A).Q$ , I e A passam a representar o resíduo suspenso da água drenada e da água da albufeira, respectivamente. Esse resíduo suspenso é o peso da quantidade de partículas sólidas em suspensão por litro de água.

Esta quantificação não foi, porém, feita. Tem sido determinada somente a turbidez da água, que, para o fim em vista, é uma medida meramente qualitativa do grau de turvação da água.

De acordo com o ponto de vista atrás referido, deveria observar-se um progressivo aumento do resíduo suspenso ou da turbidez das águas drenadas com a cota da respectiva zona de percolação. Na realidade, tal facto é observado nas águas analisadas. Os valores da turbidez medida nas águas colhidas em drenos a cotas mais elevadas apresenta valores mais elevados do que as colhidas em drenos a cotas mais baixas. Porém, e como acima se referiu, é de admitir percursos de percolação mais curtos para essas águas, o que poderá

diminuir o efeito de filtro exercido pela rede de fracturas do maciço em relação à matéria em suspensão na água infiltrada a partir da albufeira. Por outro lado, a água da albufeira apresentava também valores elevados de turbidez, contribuindo, assim, por si só, para dificultar esta análise. Em princípio, só a quantificação da matéria inorgânica em suspensão nas duas águas e a sua eventual análise química ou mineralógica poderia dar resposta correcta a esta questão.

Nas Fig. 66 e 67 apresenta-se a distribuição ao longo da fundação dos balanços iónicos, sob a forma de taxas de dissolução ou de precipitação por dreno, para o cálcio, o sódio, a soma de catiões (sódio + potássio + magnésio) e a soma de catiões (cálcio + sódio + potássio + magnésio) e de aniões (cloreto + sulfato + bicarbonato + carbonato).

A intenção de isolar o cálcio prende-se com o facto de ele ser mais representativo do ataque aos cimentos, e o isolamento do sódio por ser mais representativo da matriz rochosa; a soma dos catiões (sódio + potássio + magnésio) pode constituir um indicador do ataque à matriz rochosa, enquanto o total de iões (catiões + aniões) é representativo do ataque à globalidade do maciço, incluídos os materiais injectados (cimento).

A Fig. 66 respeita à galeria periférica. Na generalidade dos iões, as taxas são mais elevadas na zona do fundo do vale, decrescendo geralmente para as cotas mais elevadas das margens. O cálcio apresenta balanços negativos na zona do fundo do vale e na margem direita, a que corresponde naturalmente precipitação ao longo da fundação ou dos drenos. Como atrás se referiu, o índice de troca de bases nestes drenos aponta para a fixação do cálcio. Para além deste aspecto referente ao cálcio, as taxas mais baixas registam-se em águas percoladas na zona da fundação dos blocos 0 - 2, 7 - 9 e 9 - 11.

A Fig. 67 diz respeito à galeria de fundação G145. Relativamente ao cálcio dissolvido na água colhida à saída dos drenos analisados, constata-se que o balanço em relação à água da albufeira é negativo do lado da margem direita e positivo do lado da margem esquerda, com taxas que crescem, num e noutro caso, dos extremos da galeria para a zona central. Constatação idêntica foi feita em relação à galeria periférica.

O sódio apresenta balanço sempre positivo, com taxas que de-

crecem dos extremos da galeria para a zona central. Do lado da margem direita as taxas são ligeiramente mais elevadas do que do lado da margem esquerda.

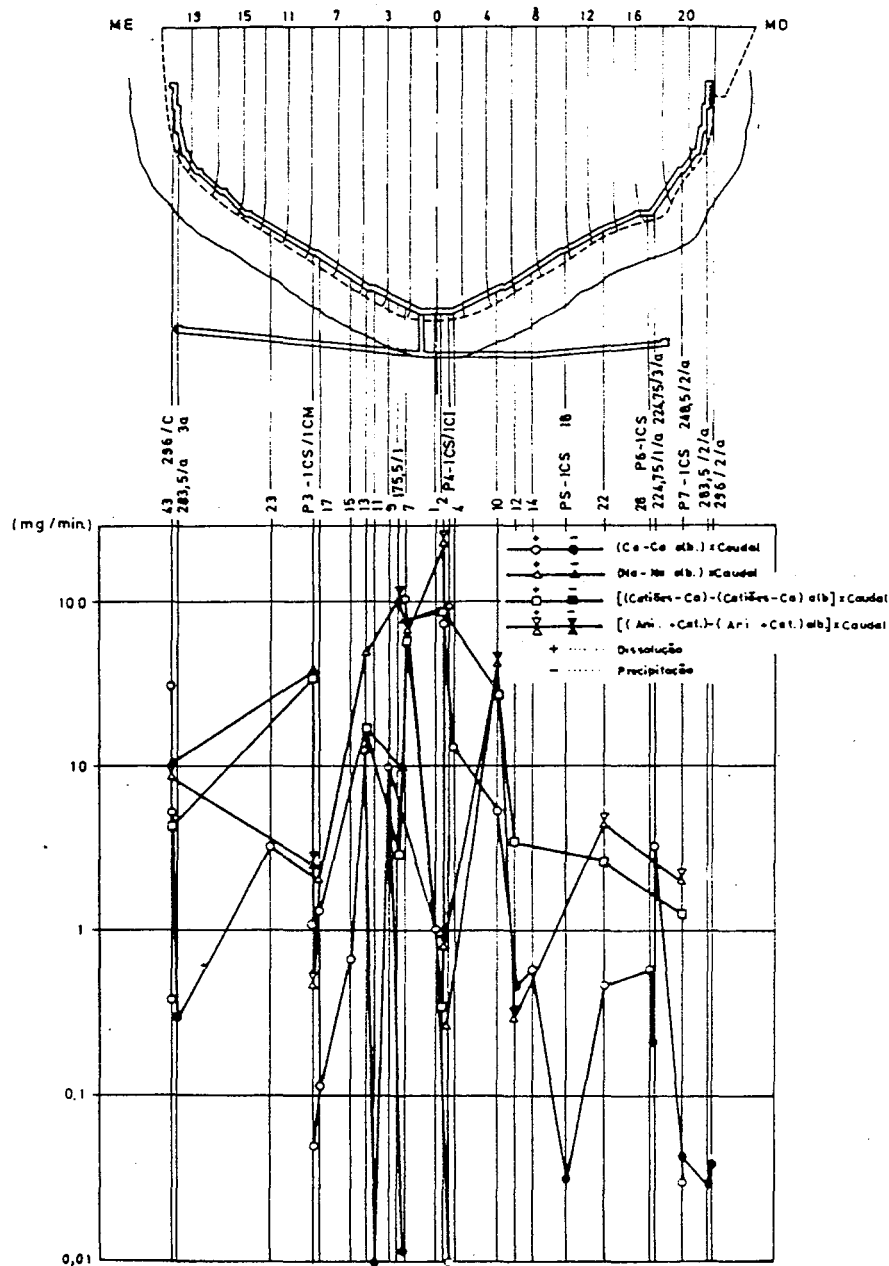


Fig. 66 - Balanços iônicos das águas drenadas pela galeria periférica.

O conjunto dos restantes catiões (sódio, magnésio e potássio), apresenta balanços positivos em todos os drenos, com excepção do dreno 165/N/A, com taxas que crescem da margem esquerda para a margem direita, com ligeira diminuição na zona central e no extremo da margem direita.

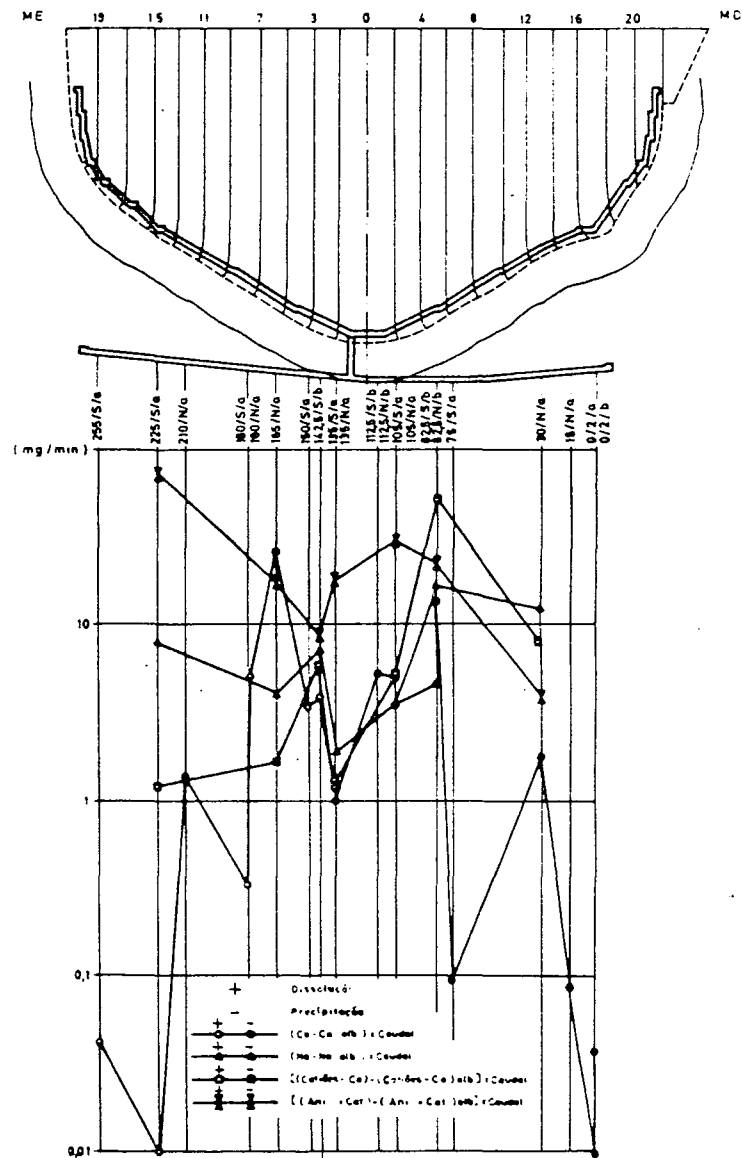


Fig. 67 - Balanços iônicos das águas drenadas pela galeria de fundação G145.

O total de sais dissolvidos, considerando a soma dos iões pesquisados (catiões + aniões) apresenta na G145 geralmente balanço

negativo, à excepção dos drenos 82,5/N/B e 105/S/A, com taxas de precipitação decrescentes da margem esquerda para a margem direita.

Esta situação poderá à primeira vista parecer contraditória com as taxas de arraste em solução do total de sais apresentadas na Fig. 63, que mostram um balanço sempre positivo. A razão está no facto daqueles balanços e correspondentes taxas terem sido calculados para um número muito maior de drenos com base no resíduo seco a 180°C, para o qual contribuem também quantidades, naturalmente pequenas, de sais correspondentes a iões não pesquisados (alumínio, por exemplo).

O facto do balanço do cálcio nas duas galerias ser positivo do lado da margem esquerda e negativo do lado da margem direita, vem dar maior consistência à análise feita em 5.3.4 sobre o índice de troca de bases (itb). Na realidade, existe uma maior fixação do cálcio e mobilidade do sódio ao longo do meio percolante da rede de drenagem do lado da margem direita do que do lado da margem esquerda.

#### 5.5 - Análise hidrogeoquímica global

As referências feitas nas alíneas anteriores à qualidade das águas, quer no âmbito estritamente hidroquímico quer no âmbito geoquímico, conduzem às seguintes considerações gerais:

- i) as águas de percolação possuem uma mineralização relativamente pouco elevada, cujos ganhos em sais dissolvidos em relação à água da albufeira somente em cerca de 35% dos casos analisados são superiores a 100% (total de sais dissolvidos na água da albufeira = 122 mg/l);
- ii) esses ganhos são obtidos, predominantemente, à custa da incorporação, durante a passagem da água pelo maciço de fundação e pelo próprio betão da base da barragem, dos sais cuja base são os iões sódio ( $\text{Na}^+$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ );
- iii) as águas atingem, na generalidade, um estado de concentração iónica que lhes retira o carácter agressivo e lhes confere potenciais características incrustantes após a percolação através do maciço de fundação e, eventualmente, do betão da base da barragem;

- iv) existem indícios de fenómenos de troca iónica, com fixação do cálcio da água de percolação pelas superfícies dos minerais com que contacta, e cedência por estas principalmente de iões de sódio, a que se juntam os iões resultantes da lixiviação associada à hidrólise dos silicatos e à destruição progressiva dos seus edifícios cristalinos, designadamente a alumina (não controlada) e a sílica;
- v) essa permuta iónica, que parece ser mais acentuada ao longo da rede de drenagem da galeria de fundação do que da galeria periférica, indiciando caminhamento em zonas de maior alteração, eventualmente com percursos mais extensos a percorrer pela água de infiltração até atingir aquela rede de drenagem, cresce da margem esquerda para a margem direita, particularmente na galeria de fundação;
- vi) tal situação ganha alguma consistência se atendermos ao facto de que a galeria de fundação se situa a profundidade maior do que a periférica e a montante da base da barragem (Fig. 12 e 13), portanto em zonas onde não foram retiradas as camadas superficiais de rocha alterada e os eventuais depósitos sedimentares (eventualmente mais susceptíveis à alteração);
- vii) a susceptibilidade à alteração (alterabilidade) do maciço de fundação, influenciada pelas características da água que o atravessa (factores extrínsecos), de que consideramos como expoente o pH, deverá revelar-se mais elevada nas zonas mais próximas da base da barragem (betão e maciço rochoso) atravessadas pela água de percolação e, em particular, dos blocos compreendidos entre as juntas 0 a 6 e 10 a 18 na margem direita e entre as juntas 5 a 17 na margem esquerda (Fig. 62), de acordo com o exposto em 5.3.2;
- viii) por sua vez, a conjugação dos valores determinados para as concentrações do total de sais dissolvidos, do cálcio (mais representativo do ataque aos cimentos), do sódio (mais representativo do ataque à matriz rochosa), da sílica (representativo das duas situações), e do pH, leva-nos a considerar, de uma forma qualitativa, que as

acções de deterioração química são relativamente mais intensas na margem direita do que na margem esquerda, e, particularmente, nas zonas de fundação alinhadas com os blocos 0-2, 4-6, 12-14, 5-7 e 7-9 (gráfico E da Fig. 62);

- ix) da mesma forma, os valores do índice de troca de bases (itb) apontam para situações de alterabilidade relativa mais elevada nas zonas da margem direita em contacto com a água de percolação, pelo que os casôs desta margem apontados na alínea anterior serão, certamente, consequência mais de situações desta natureza (maior alterabilidade) do que resultantes de uma eventual maior agressividade da água de percolação em relação à margem esquerda;
- x) por seu lado, as taxas de arraste em solução de sais do maciço de fundação atravessado, deduzidas das análises efectuadas em Novembro de 1985, podem considerar-se relativamente reduzidas, se compararmos com taxas deduzidas para outras barragens, implantadas em zonas de clima temperado e com redes de drenagem bem menos extensas;
- xi) atendendo aos volumes de água debitados pelas redes de drenagem e à tendência evolutiva observada, geralmente para ligeiro decréscimo dos caudais ou sua manutenção com pequenas oscilações, é de prever que as condições de ataque químico ao maciço de fundação não venham a sofrer, a curto ou a médio prazo, alterações significativas.



## 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 - Sobre as acções

#### 6.1.1 - Da água

Durante o período em análise, o regime de exploração do reservatório conduziu á individualização de dois períodos típicos de solicitação hidrostática. Um, entre 1979 e 1981, em que o nível oscilou entre as cotas 319 e 327 m, e outro, entre 1981 e 1984, em que o nível oscilou entre as cotas 312 e 317m. Em 1985 o nível atingiu a cota 321 m.

Relativamente às subpressões registadas, pode-se dizer que, exceptuando o caso da fundação do bloco central 0 - 2, praticamente não existem nas zonas da fundação que têm sido observadas com piezómetros.

No bloco 0-2 sempre se registaram subpressões elevadas na câmara superior do piezómetro de montante (P4-1CS), que representavam cerca de 80% da carga hidrostática.

Não são aparentes, quer neste piezómetro quer nos restantes, tendências para aumento das subpressões. O mesmo não se poderá dizer dos respectivos caudais drenados. Nas câmaras superiores dos piezómetros de montante, situados na fundação dos blocos 0-2 (P4-1CS) e 7-9 (P3-1CS), os caudais têm aumentado. Acontece que estes piezómetros se encontram a montante da rede de drenagem e as suas tomadas de pressão localizadas na faixa de contacto barragem-fundação. Se, paralelamente, não se regista tendência para aumento da subpressão, tal situação poderá querer significar que a evolução das características hidráulicas do maciço não têm sido no sentido do desenvolvimento de comunicações cada vez mais preferenciais com o reservatório, mas antes no da coalescência de diversas fracturas condutoras com idêntico potencial hidráulico.

A composição e características físico-químicas da água da albufeira apresentam uma evolução aparentemente relacionada com o tipo de exploração do reservatório. Continua a revelar características de moderada a reduzida agressividade para o carbonato de cálcio. Daqui resultam acções relativamente pouco agressivas para os materiais da fundação e dos cimentos dos betões. Porém, a sua

acção continuada poderá conduzir a estados de alteração diversos consoante o eventual desenvolvimento das acções hidroquímicas e físico-mecânicas derivadas do funcionamento estrutural.

#### 6.1.2 - Das variações de temperatura

As variações de temperatura sentidas ao longo do ano são de pequena amplitude, quer no ar quer no interior da estrutura ou na água da albufeira. Geralmente, as temperaturas do ar mais elevadas ocorrem entre Novembro e Fevereiro e as mais baixas entre Maio e Agosto. No interior da estrutura e na água as épocas de ocorrência dos valores extremos dependem, como se referiu em 4.1.2, da inércia térmica do meio, ou seja da sua condutibilidade térmica.

#### 6.1.3 - Sísmicas

O sistema de observação de acções sísmicas instalado no Songó e ao longo das margens do reservatório tornou-se inoperacional na década de setenta. Mais tarde conseguiu-se repor em funcionamento o posto sismográfico do Songó, junto ao aeroporto.

Não foi, assim, possível registar eventos sísmicos, quer naturais quer eventualmente induzidos pela instalação da albufeira após o seu primeiro enchimento. No entanto, tem sido sentidos pela população da zona, esporadicamente, sismos de pequena a média intensidade (IV - V MM). Por vezes a vibração sísmica é acompanhada de ruídos sísmicos direccionados.

### 6.2 - Sobre o comportamento da fundação

#### 6.2.1 - Mecânico

Ao longo da base da barragem só têm sido observados deslocamentos horizontais, medidos com fios de prumo invertidos, e deslocamentos, verticais e horizontais relativos, em algumas juntas de contracção, medidos com alongâmetro.

Os valores observados são reduzidos, não revelando qualquer carácter de progressividade no sentido de situações propícias ao desenvolvimento de cenários de comportamento desfavorável.

Seria desejável a existência em funcionamento de um sistema de

observação de deslocamentos no maciço de fundação que permitisse um mais amplo conhecimento das suas condições de funcionamento mecânico. E que, ao mesmo tempo, permitisse a avaliação das eventuais rotações da base da barragem.

No entanto, a relativamente baixa influência sazonal das variações de temperatura no regime de percolação observado leva a admitir que essas rotações, a existirem, são de reduzida expressão.

### 6.2.2 - Hidráulico

O volume total de água percolado através do maciço de fundação, recolhido na extensa rede de drenagem da galeria periférica e das galerias de fundação, é bastante reduzido.

Em 1985.11.15 o caudal total medido foi de 51 l/min, o que representa por dreno cerca de 0,35 l/min na galeria periférica, 0,20 l/min na galeria de fundação G145, 0,07 l/min nas galerias de fundação da margem direita (GD5 e TGD5) e 0,01 l/min nas galerias de fundação da margem esquerda (GE5 e TGE5).

Nas galerias onde aquele caudal específico é mais elevado, galeria periférica e G145, as drenâncias mais elevadas situam-se na fundação da zona central da barragem. Aí, o valor mais elevado, inferior a 5 l/min, regista-se no dreno DGP7, na fundação do bloco 1-3.

Trata-se, portanto, de drenâncias que globalmente são bastante baixas, traduzindo um aparente grau de elevada impermeabilização do maciço de fundação.

Podem, no entanto, distinguir-se zonas com condições diversificadas. Assim, a margem esquerda revela permeabilidades relativamente mais elevadas do que a margem direita.

Naturalmente, evidencia-se um aumento da permeabilidade com a cota, resultante, seguramente, do estado de menor compressão do maciço por acção estrutural da barragem.

Na zona central, os ensaios efectuados na rede de drenagem em 1985 (alínea 4.2.2.2 e 4.2.3.2) e os valores medidos nos piezómetros múltiplos mostram que as maiores condutividades hidráulicas se situam ao longo de uma faixa estreita da fundação, imediatamente abaixo da base da barragem.

Tem-se, por outro lado, que os caudais drenados se reduziram

significativamente a partir de 1981. Este facto prende-se acima de tudo com o abaixamento do nível da albufeira. Em particular, por deixar de influenciar os drenos situados a cotas mais elevadas. Porém, em 1985, quando o nível atingiu cotas da ordem de 320 m, não foram registadas, concomitantemente, alterações significativas nos caudais, o que poderá reforçar, de facto, o juízo aduzido de tendência para diminuição com acumulação de parcela irreversível.

Na galeria de fundação G145 os valores registados nos caudais e nas subpressões corroboram o que foi dito sobre as diversas condições hidráulicas das duas margens. A margem esquerda evidencia, também, através do comportamento hidráulico da rede de drenagem da G145, uma permeabilidade mais elevada.

Quer os caudais quer as subpressões apresentam valores relativamente reduzidos, e que não mostram tendência para aumentos significativos.

Em face dos resultados da observação descritos, pode considerar-se que a fundação, de uma forma global, evidencia um comportamento hidráulico aceitável. Isto é, um baixo nível de caudais drenados e a quase ausência de subpressões nos piezómetros instalados ao longo da inserção da barragem. Excepção feita, claro, para os casos pontuais referidos, em particular na fundação do bloco 0-2.

### 6.2.3 - Hidrogeoquímico

Os depósitos, mais ou menos volumosos, de carbonato de cálcio ao longo das paredes e pisos das galerias devem-se, sobretudo, à sua precipitação de águas infiltradas através do betão (juntas ou fissuras).

A ausência de depósitos de carbonato de cálcio ou a sua reduzida expressão ao longo da rede de drenagem está em perfeita concordância com os resultados da análise e interpretação hidroquímica anteriormente descrita.

Estes dois aspectos podem, mesmo, levar a considerar a hipótese de se estar a processar alguma colmatação da trama de fissuras condutoras do maciço rochoso de fundação, em especial na margem direita e fundo do vale.

Essa colmatação, a processar-se, deve sê-lo à custa dos produ-

tos de alteração dos minerais da matriz rochosa, que por efeito de filtro se vão depositando ao longo das superfícies das fracturas, e da eventual incorporação por estas de cálcio da água percolada por fenómenos de troca iónica.

Porém, relativamente à matriz rochosa, não parece ocorrer alteração significativa dos minerais constituintes. Esta conclusão deriva do baixo teor em sais arrastados em solução pela água percolada.

É, no entanto, ao longo da faixa de fundação imediatamente abaixo da base da barragem que se registam os valores mais elevados, em particular na zona do fundo do vale.

Aparentemente, porém, não parece estarem a derivar desse fenómeno consequências negativas no actual comportamento hidromecânico da fundação.

Os resultados da observação futura do comportamento hidráulico da fundação em situações de níveis mais elevados poderão vir a contribuir para a confirmação ou não desta suposição.

### 6.3 - Sobre o trabalho realizado e as perspectivas futuras

O comportamento hidromecânico da fundação da barragem ficou já ilustrado nos números anteriores de uma forma que se julga suficientemente clara.

Para o seu estudo mais aprofundado e completo no período em análise teria sido útil dispor também da informação adequada: i) no domínio dos deslocamentos eventualmente processados no interior do maciço de fundação e na base da barragem; ii) sobre a evolução das características hidroquímicas da água percolada desde o final da fase de primeiro enchimento da albufeira.

Considera-se, no entanto, ter sido, mesmo assim, possível com a informação disponível traçar um quadro suficientemente compreensivo desse comportamento.

É de realçar, acima de tudo, a contribuição dos elementos de análise hidrogeoquímica e das análises quantitativas elaboradas sobre os dados de observação hidráulica no presente estudo. Na verdade, quer uns quer outros, revelaram-se como metodologias de elevado potencial para os estudos do comportamento hidráulico dos maciços de fundação.

A definição e aprofundamento de índices hidroquímicos, que permitam, por um lado, despistar a agressividade do meio e as condições de alteração dos materiais e, por outro lado, avaliar as taxas, projectando a sua evolução temporal, parece ser o desenvolvimento adequado para esta metodologia de base hidrogeoquímica.

São conhecidos casos em que a deterioração física, mecânica e química dos materiais da fundação conduziram a situações de alteração profunda do seu funcionamento hidráulico. A inclusão de metodologias deste tipo nos planos de observação das obras permitirá a identificação atempada do fenómeno e do seu desenvolvimento, e, ainda, formular juízos sobre as convenientes medidas correctivas.

No caso presente, embora até 1985 se tenham determinado sistematicamente as características da água da albufeira (acção hidroquímica), somente nesse ano, e posteriormente, se determinaram as características da água percolada (efeitos hidrogeoquímicos). Mesmo assim, os resultados obtidos transmitem a confiança de que quer as acções agressivas da água infiltrada quer os correspondentes efeitos são moderados a reduzidos, conclusão, aliás, corroborada pelos resultados da observação do comportamento hidráulico.

A relação, sumariamente referida em 5.4, entre estes dois campos de observação, hidroquímico e hidráulico, será melhor entendida e quantificada através de modelos de análise acoplada dos resultados obtidos, cujo desenvolvimento passa necessariamente pela exploração futura destas metodologias, as quais, entretanto, têm vindo também a ser estendida às barragens portuguesas.

Ficam, deste modo, em aberto no domínio da deterioração dos materiais (maciço rochoso de fundação e corpo da estrutura) campos com elevado potencial de investigação. Designadamente, no da compreensão dos fenómenos de índole geoquímica (modelos compreensivos), no da sua influência nas propriedades geotécnicas dos materiais e estruturas e, finalmente, no da observação e modelação das correspondentes acções e efeitos.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Abril de 1989.

VISTOS

AUTORIA

O CHEFE DO NÚCLEO DE OBSERVAÇÃO

*Carlos Alberto Florentino*

Carlos Alberto Florentino

*Henrique dos Santos da Silva*

Henrique dos Santos da Silva  
Geólogo, Assistente de Inv.

O CHEFE DO DEPARTAMENTO DE BARRAGENS

*José de Oliveira Pedro*

José de Oliveira Pedro

O SUBDIRECTOR

*M-*

Ricardo Oliveira

## Referências bibliográficas

- Barros, L.A., 1967 - "Notas petrográficas sobre algumas rochas de Cahora-Bassa"; Hidrotécnica Portuguesa (HP), Lisboa, 1967.
- Barros, L.A., 1971 - "Alteração e alterabilidade de rochas ígneas"; LNEC, Lisboa, 1971.
- Carroll, D., 1970 - "Rock weathering"; Ed. Plenum Press, Nova Iorque, 1970.
- Custódio, E., 1976 - "Hidrologia subterrânea"; Barcelona, 1976.
- C.S.O.P.T., 1988 - "Regulamento de segurança de Barragens"; Elaborado pela Subcomissão dos Regulamentos de Barragens, Lisboa, 1988.
- Davis, S.N., Dewiest, R.J.M., 1966 - "Hydrogeology"; Ed. Wiley, Nova Iorque, 1966.
- Ebinger, C.J., Rosendahl, B.R. e Reynolds, D.J., 1987 - "Tectonic model of the Malawi rift, Africa"; Tectonophysics n° 141, 1987.
- EDP, 1984 - "Barragem de Venda Nova. Cortina de impermeabilização - 2ª fase. Sistema de observação"; EDP, Porto, 1984.
- Florentino, C.A., 1983 - "O controlo da segurança de barragens de betão"; Programa de investigação para acesso a Investigador-Coordenador, LNEC, 1983.
- Gignoux, M., 1960 - "Géologie Stratigraphique"; Ed. Masson e Cie, Paris, 1960.
- Gomes, A.F.S., 1981 - "Automatização das actividades de observação de barragens e análise quantitativa de resultados"; Tese para obtenção do grau de especialista, LNEC, Lisboa, 1981.
- Guha, S.K., Padale, J.G. e Gosavi, P.D., 1981 - "Probable risk estimation due to reservoir induced seismicity"; TTL (Dams and earthquake), Londres, 1981.
- Hatch, F.H., Wells, A.K. e Wells, M.K., 1949 - "The petrology of



- igneous rocks"; Ed. Thomas Murby, Londres, 1949.
- HCB, 1987 - "Modelação analítica dos regimes de afluências"; Songo, 1987.
- ICOLD, 1981 - "Deterioration of dams and reservoirs, including failures"; Relatório final do Comité de deterioração de barragens e reservatórios (CDDR), ICOLD, 1981.
- ICOLD, 1987 - "Exposure of concrete in dams to special aggressive agents"; Committee on materials for concrete dams (CMCD), ICOLD, 1987.
- Krauskopf, K.B., 1972 - "Introdução à geoquímica"; Ed. Polígono, São Paulo, 1972.
- Lamy, J.B. e Coelho, A.P., 1945 - "Rochas do distrito de Tete - Subsídio para o conhecimento petrográfico de Moçambique"; Lisboa, 1945.
- Lladó, N.L., 1970 - "Fundamentos de hidrogeologia carstica"; Ed. Blume, Madrid, 1970.
- LNEC, 1949 - "Plano de observação da barragem de Venda Nova"; LNEC, Lisboa, 1949.
- LNEC, 1966 - "Observação da barragem do Carrapatelo. Plano de observação"; LNEC, Lisboa, 1966.
- LNEC, 1968 - "Estudos da alterabilidade dos lamprófiros de Cahora-Bassa - Relatório preliminar"; LNEC, Lisboa, 1968.
- LNEC, 1969 - "Estudo das fundações da barragem de Cahora-Bassa - 1º Relatório"; LNEC, Lisboa, 1969.
- LNEC, 1969a - "Estudo das fundações da barragem de Cahora-Bassa - 2º Relatório"; LNEC, Lisboa, 1969.
- LNEC, 1970 - "Estudo das fundações da barragem de Cahora-Bassa - 3º Relatório"; LNEC, Lisboa, 1970.
- LNEC, 1972 - "Plano de observação da barragem de Cahora-Bassa"; LNEC, Lisboa, 1972.
- LNEC, 1973 - "Estudo da alteração e alterabilidade dos lamprófiros

- de Cahora-Bassa"; LNEC, Lisboa, 1973.
- LNEC, 1973a - "Estudo sísmico da barragem de Cahora-Bassa"; LNEC, Lisboa, 1973.
- LNEC, 1974 - "Plano de observação da barragem do Varosa"; LNEC, Lisboa, 1974.
- LNEC, 1977 - "Risco sísmico em grandes empreendimentos"; Seminário 232, LNEC, Lisboa, 1977.
- LNEC, 1978 - "O cimento e o betão das obras de Cahora-Bassa"; LNEC, Lisboa, 1978.
- LNEC, 1979 - "Plano piezométrico da barragem de Cahora-Bassa"; LNEC, Lisboa, 1979.
- LNEC, 1984 - "Deteriorações químicas em barragens de betão"; LNEC, Lisboa, 1984.
- LNEC, 1984a - "Plano de observação do escalão do Torrão"; LNEC, Lisboa, 1984.
- LNEC, 1986 - "Plano de observação do escalão do Alto Lindoso - vol. 1 - Observação da barragem, fundação, maciço envolvente e reservatório"; LNEC, Lisboa, 1986.
- LNEC, 1986a - "Plano de observação da barragem do Funcho - Vol. 1 - Observação da barragem, fundação, maciço envolvente e reservatório"; LNEC, Lisboa, 1986.
- LNEC, 1988 - "Plano de observação da barragem do Funcho. Estudo da evolução das características geotécnicas da fundação"; LNEC, Lisboa, 1988.
- Louis, C., 1974 - "Rock hydraulics"; B.R.G.M. Orléans, 1974.
- Mascarenhas, A.A.F.T., 1979 - "Percolação na fundação de barragens de betão"; Tese para obtenção do grau de especialista, LNEC, Lisboa, 1979.
- Miranda, A.M., 1986 - "Alteração experimental de rochas - a contribuição do Instituto Superior Técnico"; Ed. GEOTECNIA n° 48, Lisboa, 1986.

- Oliveira, R., 1983 - "Estudo geotécnico de maciços rochosos de fundação de barragens. Contribuição da Geologia de Engenharia"; Programa de investigação para acesso a Investigador-Coordenador, LNEC, 1983.
- Pedro, J.O., 1987 - "A engenharia das barragens de betão em Portugal. Estruturas mais importantes e alguns estudos"; Confª Ibero-Americana sobre Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa, 1987.
- Richter, C.F., 1958 - "Elementary Seismology"; Ed. W.H. Freeman and Co., S. Francisco, 1958.
- Rocha, M., 1981 - "Mecânica das Rochas"; LNEC, 1981.
- Rodrigues, F.P., Graça, J.G.C., Pinto, J.L., Pedro, J.O., Ferreira, M.J.E., Grossmann, N.F., 1983 - "Desenvolvimentos recentes no domínio da Mecânica das Rochas"; LNEC, 1983.
- Rodrigues, J.D., 1975 - "Alterabilidade de rochas em problemas de Geologia de Engenharia. Aplicação a casos portugueses"; Tese para obtenção do grau de especialista, LNEC, Lisboa, 1975.
- Rodrigues, J.D., 1978 - "Some problems raised by the study of the weathering of igneous rocks"; Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, UNESCO/RILEM, Paris, 1978.
- Rodrigues, J.D., 1984 - "Aplicação das matrizes de impacto da CIGB à barragem de Castelo do Bode"; GEONOVAS nº 7, Lisboa, 1984.
- Rodrigues, L.F., 1982 - "Métodos de prospecção sísmica em Geologia de Engenharia. A importância da onda de corte"; Tese para obtenção do grau de especialista, LNEC, 1982.
- Sabarly, F., 1968 - "Les injections et les drainages de fondation de barrages"; Geotechnique nº 18, pp 229-249, 1968.
- Santos, P., 1963 - "Estudo geológico do local da barragem de Cahora-Bassa"; Missão de Fomento do Plano do Zambeze (MFPZ-BGMP), Lisboa, 1963.
- Serafim, J.L. e Oliveira, C.S., 1987 - "Effects caused by earthquakes on dams"; Symposium on Earthquakes and dams, ICOLD, Pequim, 1987.

- Silva, H.S., 1987 - "Observação da deterioração química de maciços de fundação de barragens de betão. Alguns aspectos e metodologias de aplicação"; Confª Ibero-Americana sobre Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa, 1987.
- Silva, H.S., Bravo, M.P., 1987 - "Barragem de Venda Nova. Aspectos do comportamento e do controlo de segurança"; Confª Ibero-Americana sobre Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa, 1987.
- Skipp, B.O. e Higgins, M., 1981 - "The potential for induced seismicity-geological approaches"; TTL (Dams and earthquake), Londres, 1981.
- Thadeu, D., 1967 - "Reconhecimento geotécnico - Processo de concurso - Anexo 2"; Hidrotécnica Portuguesa (HP), Lisboa, 1967.
- Trepa, M.V., 1970 - "Contribuição para o conhecimento do risco sísmico em Moçambique"; Geo nº 43, Lisboa, 1970.
- Upsher, F.J., 1968 - "Fungal spora of the air at the joint tropical research unit, Innisfail, Queensland"; in Biodeterioration of materials - Ed. Elsevier, Nova Iorque, 1968.
- Zajic, J.E., 1971 - "Water pollution - Disposal and reuse"; Ed. Marcel Dekker, Nova Iorque, 1971.

