



**Bernardo Maria Abecasis Jalles**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação dos efeitos estruturais da  
lixiviação das argamassas de ligação  
dos blocos das barragens de alvenaria  
de pedra**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor António Lopes Batista  
Co-orientador: Doutor José Vieira de Lemos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu  
Arguente: Prof. Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana  
Vogal: Prof. Doutor António Lopes Batista



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2017**



**Copyright © Bernardo Maria Abecasis Jalles, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Aos meus Avôs

Augusto Jalles e Fernando Abecasis



## Agradecimentos

Gostaria de manifestar o meu agradecimento a quem, de uma maneira ou de outra, contribuiu para a realização desta dissertação de mestrado.

Assim, em primeiro lugar quero mencionar o Professor António Lopes Batista, meu orientador, diretor do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela disponibilidade e apoio demonstrados durante a realização do trabalho, partilhando comigo um enorme entusiasmo no desenvolvimento do tema e inculcando-me a atitude de tornar esta dissertação mais do que um trabalho de final de curso, no sentido de se dar um contributo na evolução do conhecimento sobre o comportamento das barragens de alvenaria de pedra.

Ao Doutor Engenheiro José Vieira de Lemos, meu co-orientador, não posso deixar de salientar e agradecer todo o apoio dado, em particular na utilização do programa de cálculo automático FLAC, o que muito contribuiu para a concretização deste trabalho.

À EDP, através do Eng<sup>o</sup> José Ilídio Ferreira, pela autorização concedida para utilizar os elementos da observação das barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, esperando que este estudo possa constituir um contributo positivo na gestão das obras que integram os aproveitamentos hidráulicos em que estão integradas.

Ao LNEC, pelo acolhimento concedido para a realização do trabalho no âmbito do projeto de investigação MEBAD, proporcionando-me as melhores condições para o seu desenvolvimento e a oportunidade para aprender com os melhores, fazendo jus à fama de instituição de prestígio internacional.

Aos funcionários do DBB com quem convivi, que sempre me ajudaram quando precisei, mas em particular quero salientar o apoio e a cumplicidade dos colegas do Núcleo de Observação (NO) António Pinto Tavares, Francisco Borralho, Hugo Pernetá, David Gonçalves Pereira, entre outros.



## Resumo

As barragens de alvenaria de pedra são, em regra, estruturas antigas. Para garantir a funcionalidade e a segurança das obras em exploração, estas estruturas são sujeitas periodicamente a obras de beneficiação e reabilitação, essencialmente para assegurar o seu monolitismo estrutural e a impermeabilidade que progressivamente se perdem por diferentes causas, em geral associadas a efeitos térmicos, ações sísmicas e, sobretudo, à lixiviação das argamassas que ligam os blocos de pedra. Esta lixiviação provoca uma degradação progressiva da estrutura, ocasionando a perda de resistência e da rigidez mecânica, afetando o seu comportamento estrutural e hidráulico.

No trabalho desenvolveu-se uma metodologia de avaliação dos efeitos estruturais da deterioração das alvenarias das barragens considerando a lixiviação das argamassas de ligação dos blocos, a partir de análises expeditas das águas realizadas nas inspeções periódicas e dos resultados da observação de deslocamentos e de caudais infiltrados pelo corpo das obras. A partir dos caudais infiltrados, avaliou-se a permeabilidade média das alvenarias e estimaram-se as perdas de massa associadas à referida lixiviação. Com os deslocamentos observados estimaram-se os módulos de elasticidade médios das estruturas e estabeleceu-se uma correlação entre as referidas perdas de massa e a parcela dos deslocamentos atribuídos aos efeitos do tempo. As análises apoiaram-se em modelos planos de percolação e estruturais, representativos do comportamento dos perfis transversais das obras, que foram resolvidos pelo programa comercial FLAC, que se baseia no método das diferenças finitas. Utilizaram-se como casos de estudo as quatro barragens de alvenaria portuguesas para as quais se dispõe dos elementos de observação requeridos, que são as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro.

Os resultados obtidos são prometedores no que respeita à interpretação dos deslocamentos que se verificam ao longo do tempo nas obras, considerando a deterioração estrutural devida à lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens de alvenaria de pedra.

**Palavras-chave:** Barragem gravidade de alvenaria; Comportamento observado; Diferenças finitas; Lixiviação das argamassas; Módulo de elasticidade; Permeabilidade.



# Abstract

Masonry stone dams are, generally, old structures. In order to ensure their serviceability and safety, these structures are periodically subjected to improvement and rehabilitation works, mainly to restore an adequate structural behavior and to guarantee its impermeability, which are gradually affected over time due to different causes, usually associated to thermic effects, seismic actions and, mainly, by the leaching of the mortars that link the stone blocks. This leaching provokes a structural degradation, which causes the decrease of mechanical strength and stiffness and, consequently, influence its structural and hydraulic behavior.

In this study it was developed a methodology for the evaluation of the effects of structural degradation in the masonry dams considering the leaching of the mortars that link the stone blocks, through the analysis of water collected in periodical inspections and the results of the observed displacements and also the infiltrated flows through these hydraulic structures. Within the infiltrated flows it was evaluated the average permeability of the masonries and it was estimated the mass lost due the leaching effect. With the observed displacements it was estimated the average elasticity modulus and established a correlation between the referred mass lost and the portion of the displacements attributed to the time effects. The analyzes were based on two-dimension models, representatives of the percolation and the structural behavior of the dams profiles, which were solved by the well-known code FLAC, which is based on the finite difference method. The four Portuguese masonry dams used in this study, for which the required observation elements are available, are the Guilhofrei, Andorinhas, Freigil and Covão do Ferro dams.

The results obtained are promising as regards the interpretation of the displacements that occur over time in masonry dams, considering the structural deterioration due to the leaching of the mortars that link their stone blocks.

**Keywords:** Gravity masonry dams; Observed behavior; Finite differences; Leaching of the mortars; Modulus of elasticity; Permeability.



# Índice geral

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Abstract .....	IX
Índice geral.....	XI
Índice de figuras .....	XV
Índice de Quadros .....	XXV
Simbologia e notações.....	XXXI
1. Considerações iniciais .....	1
1.1 Interesse e enquadramento do tema .....	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	1
1.3 Abordagem adotada no desenvolvimento do trabalho .....	2
1.4 Organização da dissertação .....	2
2. Resenha sobre barragens de alvenaria e casos de estudo escolhidos .....	5
2.1 Generalidades sobre barragens de alvenaria .....	5
2.1.1 Aspetos históricos.....	5
2.1.2 Formas das obras .....	7
2.1.3 Materiais e técnicas construtivas .....	8
2.2 Barragens de alvenaria portuguesas .....	9
2.3 Características das barragens consideradas no estudo .....	10
2.3.1 Considerações gerais .....	10
2.3.2 Barragem de Guilhofrei.....	11
2.3.3 Barragem de Andorinhas.....	14
2.3.4 Barragem de Freigil.....	17
2.3.5 Barragem do Covão do Ferro .....	20

2.4	Características das alvenarias de barragens .....	24
3.	Metodologias de análise da percolação e de análise estrutural de barragens de alvenaria..	27
3.1	Percolação em corpos permeáveis.....	27
3.1.1	Aproximações de meios contínuos e descontínuos .....	27
3.1.2	Conceitos de porosidade e permeabilidade .....	28
3.1.3	Equações governativas do escoamento.....	28
3.2	Análise estrutural de corpos deformáveis .....	28
3.3	Programa de cálculo automático utilizado .....	29
3.3.1	Características do programa de cálculo escolhido.....	29
3.3.2	Método de diferenças finitas .....	30
3.3.3	Exemplo de teste .....	34
4.	Análise da percolação através do corpo das barragens de alvenaria .....	37
4.1	Considerações gerais.....	37
4.2	Análise da percolação nas quatro barragens .....	37
4.2.1	Barragem de Guilhofrei.....	37
4.2.2	Barragem de Andorinhas.....	39
4.2.3	Barragem de Freigil.....	42
4.2.4	Barragem do Covão do Ferro .....	45
4.3	Análise crítica dos resultados.....	49
5.	Quantificação simplificada da lixiviação das argamassas a partir dos caudais infiltrados e das características das águas .....	53
5.1	Metodologia de avaliação da lixiviação das argamassas.....	53
5.2	Quantificação da lixiviação das argamassas nos quatro casos de estudo .....	54
5.2.1	Barragem de Guilhofrei.....	54
5.2.2	Barragem de Andorinhas.....	56
5.2.3	Barragem de Freigil.....	57
5.2.4	Barragem do Covão do Ferro .....	59
5.3	Análise sucinta dos resultados .....	62
6.	Interpretação dos deslocamentos observados ao longo do tempo nas barragens de alvenaria	63
6.1	Considerações gerais.....	63

6.1.1	Modelos estruturais considerados.....	63
6.1.2	Notas sobre a observação de deslocamentos por métodos geodésicos.....	63
6.2	Método de interpretação dos deslocamentos observados.....	64
6.2.1	Aspetos gerais.....	64
6.2.2	Generalidades sobre os métodos de interpretação quantitativa.....	64
6.2.3	Ação correspondente à lixiviação das argamassas de ligação.....	67
6.3	Barragem de Guilhofrei.....	68
6.3.1	Monitorização de deslocamentos.....	68
6.3.2	Resultados do modelo numérico.....	69
6.4	Barragem de Andorinhas.....	71
6.4.1	Monitorização de deslocamentos.....	71
6.4.2	Resultados do modelo numérico.....	72
6.5	Barragem de Freigil.....	74
6.5.1	Monitorização de deslocamentos.....	74
6.5.2	Resultados do modelo numérico.....	75
6.6	Barragem do Covão do Ferro.....	77
6.6.1	Monitorização de deslocamentos.....	77
6.6.2	Resultados dos modelos numéricos.....	78
6.7	Análise crítica dos resultados obtidos.....	84
7.	Considerações finais.....	87
7.1	Contributo do trabalho para a engenharia de barragens.....	87
7.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros.....	88
	Referências bibliográficas.....	89
	Anexos.....	91
	Anexo I.....	93
	Anexo II.....	105

(página deixada deliberadamente em branco)

# Índice de figuras

Figura 2.1 - Perfil transversal da barragem de Alcantarilla (Aranda Gutiérrez, 2003) .....	5
Figura 2.2 - Ruínas do muro de alvenaria da barragem de Alcantarilla (Aranda Gutiérrez et al., 2003) .....	6
Figura 2.3 - Ruínas da barragem de Belas (Firmino, 2011) .....	6
Figura 2.4 - Evolução do perfil transversal das barragens de alvenaria: (a) usado nos primórdios; (b) forma com otimização teórica; (c) forma mais comum .....	8
Figura 2.5 - Barragem da Lagoa Comprida, estrutura de planta poligonal localizada na serra da Estrela (EDP, 2016) .....	8
Figura 2.6 - Técnicas e materiais mais utilizados na construção das barragens de alvenaria. ....	9
Figura 2.7 - Barragem de Guilhofrei (visita à barragem em fevereiro de 2017) .....	11
Figura 2.8 - Barragem de Guilhofrei. Planta, alçado de montante e corte transversal .....	12
Figura 2.9 - Barragem de Andorinhas (LNEC, 2016c) .....	14
Figura 2.10 - Barragem de Andorinhas. Planta, alçado de jusante e cortes transversais .....	15
Figura 2.11 - Barragem de Freigil (LNEC, 2010) .....	17
Figura 2.12 - Barragem de Freigil. Planta, alçado de montante e corte transversal .....	18
Figura 2.13 - Vista geral da barragem de Covão do Ferro .....	20
Figura 2.14 - Barragem de Covão do Ferro. Planta e perfil transversal (LNEC, 2016d) .....	21
Figura 2.15 – Barragem do Covão do Ferro. Aspectos dos trabalhos de colocação da membrana de impermeabilização no paramento de montante .....	22
Figura 3.1 - Discretização de uma região R contínua (Fortuna, 2000) .....	30
Figura 3.2 - Malha de pontos uniformemente espaçados .....	31
Figura 3.3 - Pontos utilizados na expressão (3.15) para o cálculo da primeira derivada de $f$ por diferenças progressivas .....	32
Figura 3.4 - Pontos com espaçamento não-uniforme .....	33

Figura 3.5 - Representação do modelo da barragem e da fundação do exemplo de teste, com os diferentes elementos da malha de cálculo: em coordenadas isoparamétricas (à esquerda) e em coordenadas cartesianas (à direita).....	34
Figura 3.6 – Exemplo de teste. Representação da pressão hidrostática e das zonas com diferentes permeabilidades.....	35
Figura 3.7 – Exemplo de teste. Resultados da análise de percolação pelo corpo da barragem, em termos de velocidades de escoamento (vetores) e de pressões internas (cores).....	35
Figura 3.8 – Exemplo de teste. Representação dos deslocamentos devidos à pressão hidrostática .....	36
Figura 3.9 – Exemplo de teste. Representação das temperaturas equivalentes à perda de massa por lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias (cores) e dos correspondentes deslocamentos (vetores). .....	36
Figura 4.1 - Barragem de Guilhofrei. Modelo para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades.....	38
Figura 4.2 - Barragem de Guilhofrei. Caudais médios infiltrados e variação do nível da albufeira entre 2000 e 2017 .....	38
Figura 4.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas .....	39
Figura 4.4 - Barragem de Andorinhas. Caudais médios de infiltração pelo corpo da obra, calculados a partir dos valores observados nos drenos da alvenaria entre 1998 e 2017 .....	40
Figura 4.5 - Barragem de Andorinhas. Modelo para análise da percolação no corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades.....	40
Figura 4.6 - Barragem de Andorinhas. Caudais médios infiltrados e variação do nível da albufeira entre 1998 e 2017 .....	41
Figura 4.7 - Barragem de Andorinhas. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas .....	41
Figura 4.8 - Barragem de Freigil. Modelo para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades.....	42
Figura 4.9 - Barragem de Freigil. Planta com a representação das cinco bicas .....	43
Figura 4.10 - Resultados dos ensaios realizados pela EDP em junho de 2017, para averiguação do contributo nos caudais medidos nas bicas da percolação com origem em eventuais fissuras nas juntas das alvenarias do revestimento do troço de canal de adução.....	43
Figura 4.11 - Barragem de Freigil. Caudais medidos na Bica 3 e variação do nível da albufeira entre 2003 e 2017 .....	44

Figura 4.12 - Barragem de Freigil. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas .....	44
Figura 4.13 - Localização em planta das secções transversais representadas nos modelos planos, localizadas próximas dos pontos de observação de deslocamentos PC4 e PC5.....	45
Figura 4.14 – Barragem do Covão do Ferro. Modelos para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades (secção 1 à esquerda e secção 2 à direita) .....	45
Figura 4.15 – Barragem do Covão do Ferro. Variação do nível da albufeira e caudais totais infiltrados pelo corpo da obra entre 1987 e 1993.....	46
Figura 4.16 – Barragem do Covão do Ferro. Variação do nível da albufeira e caudais totais infiltrados pelo corpo da obra e drenados na membrana de impermeabilização do paramento de montante, entre 2006 e 2017 .....	46
Figura 4.17 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios dos caudais infiltrados pelo corpo da obra (bicas BP) e drenados na membrana de impermeabilização do paramento de montante (drenos D1 a D5), entre 2006 e 2017, para níveis da albufeira acima da cota 1565,74 m .....	47
Figura 4.18 - Barragem do Covão do Ferro (secção 1) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 1987 e 1993.....	47
Figura 4.19 - Barragem do Covão do Ferro (secção 2) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 1987 e 1993.....	48
Figura 4.20 - Barragem do Covão do Ferro (secção 1) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 2006 e 2017.....	48
Figura 4.21 - Barragem do Covão do Ferro (secção 2) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 2006 e 2017.....	49
Figura 4.22 - Comparação dos valores dos coeficientes de permeabilidade de barragens de alvenaria francesas e da barragem da Póvoa, obtidos em ensaios, e das quatro barragens portuguesas em estudo (valores estimados a partir da análise da percolação pelo seu corpo)....	51
Figura 5.1 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2004, 2008, 2010, 2013 e 2016 .....	54
Figura 5.2 - Barragem de Guilhofrei. Valores do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas do dreno DB6 em 2004, 2006, 2010 e 2013.....	54
Figura 5.3 - Barragem de Guilhofrei. Valores da diferença do TSD da água infiltrada e da água da albufeira, em 2004, 2010 e 2013 .....	55

Figura 5.4 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios de pH e de índice de agressividade da água da albufeira em 2004, 2010 e 2013 .....	55
Figura 5.5 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2004, 2008, 2010 e 2016 .....	56
Figura 5.6 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas dos drenos da alvenaria em 2004, 2006, 2008, 2010, 2013 e 2016 .....	56
Figura 5.7 - Barragem de Andorinhas. Valores da diferença do TSD da água infiltrada e da água da albufeira, em 2004, 2008, 2010 e 2016 .....	56
Figura 5.8 - Barragem de Andorinhas. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira e 2004, 2010 e 2013 .....	57
Figura 5.9 - Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2005, 2007 e 2015 .....	58
Figura 5.10 – Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas da bica 5 em 2005, 2007 e 2015 .....	58
Figura 5.11 - Barragem de Freigil. Valores da diferença do TSD da água coletada na bica 5 e da água da albufeira, em 2005, 2007 e 2015 .....	58
Figura 5.12 - Barragem de Freigil. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira em 2005, 2007 e 2015 .....	59
Figura 5.13 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 1988 e 1989 .....	59
Figura 5.14 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas das bicas em 1988, 1989 e 1993 .....	60
Figura 5.15 - Barragem do Covão do Ferro. Valores da diferença do TSD da água coletada nas bicas e da água da albufeira, em 1988 e 1989 .....	60
Figura 5.16 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2015 .....	61
Figura 5.17 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas das bicas, em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015 .....	61
Figura 5.18 - Barragem do Covão do Ferro. Valores da diferença do TSD da água coletada nas bicas e da água da albufeira, em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015 .....	61
Figura 5.19 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015 .....	62
Figura 6.1 - Representação das três parcelas dos deslocamentos observados .....	65

Figura 6.2 - Representação da deformada de uma barragem devido ao efeito da pressão hidrostática .....	65
Figura 6.3 - Representação gráfica da variação dos deslocamentos em função da temperatura ao longo do ano.....	66
Figura 6.4 – Interpretação física dos deslocamentos de uma barragem gravidade devidos ao efeito das variações anuais de temperatura, no inverno e nos verão .....	66
Figura 6.5 - Representação da deformada de uma barragem devida aos efeitos do tempo associadas à degradação das alvenarias do seu corpo por lixiviação das argamassas de ligação	67
Figura 6.6 - Representação gráfica da evolução dos deslocamentos ao longo do tempo.....	67
Figura 6.7 - Barragem de Guilhofrei. Esquema de rede de triangulação (LNEC, 2013) .....	68
Figura 6.8 - Barragem de Guilhofrei. Esquema e localização aproximada dos pontos da LNG do coroamento (LNEC, 2013).....	69
Figura 6.9 - Barragem de Guilhofrei. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	70
Figura 6.10 - Barragem de Guilhofrei. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	71
Figura 6.11 - Barragem de Andorinhas. Rede planimétrica (por jusante): 3 alvos de pontaria ótica, embutidos nos muros laterais do descarregador e no contraforte central (M1, M2 e M3).....	71
Figura 6.12 - Barragem de Andorinhas. Rede altimétrica: 3 marcas de nivelamento situadas no coroamento, nas zonas dos contrafortes .....	72
Figura 6.13 - Barragem de Andorinhas. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	73
Figura 6.14 - Barragem de Andorinhas. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	73
Figura 6.15 - Barragem de Freigil. Rede planimétrica (por montante): 11 alvos nos pilares de suporte do passadiço do coroamento, acima da crista do descarregador .....	74
Figura 6.16 - Barragem de Freigil. Rede altimétrica: 11 marcas de nivelamento nos pilares de suporte do passadiço do coroamento, acima da crista do descarregador .....	75
Figura 6.17 - Barragem de Freigil. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	76

Figura 6.18 - Barragem de Freigil. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	77
Figura 6.19 - Barragem do Covão do Ferro. Rede geodésica planimétrica .....	78
Figura 6.20 - Barragem do Covão do Ferro. Esquema e localização aproximada dos pontos da LNG do coroamento.....	78
Figura 6.21 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 1987 e 1992). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 1, calculados através do programa FLAC 7.0. ....	79
Figura 6.22 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 1987 e 1992). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 2, calculados através do programa FLAC 7.0. ....	80
Figura 6.23 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 2006 e 2017). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 1, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	80
Figura 6.24 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 2006 e 2017). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 2, calculados através do programa FLAC 7.0 .....	81
Figura 6.25 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1992 (secção 1). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC .....	82
Figura 6.26 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1992 (secção 2). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC .....	82
Figura 6.27 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 2006 e 2017 (secção 1). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC .....	83
Figura 6.28 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 2006 e 2017 (secção 2). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC .....	83
Figura 6.29 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade das barragens de alvenaria francesas (obtidos em ensaios de amostras carotadas) e das quatro barragens portuguesas em estudo (valores estimados a partir da análise de modelos numéricos) .....	85
Figura 6.30 - Deslocamentos radiais. Comparação dos resultados da observação (efeitos do tempo) e dos valores estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, para as barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro .....	86

Figura 6.31 - Deslocamentos verticais. Comparação dos resultados da observação (efeitos do tempo) e dos valores estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, para as barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro .....	86
Figura II.1 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto BC do coroamento, entre 1973 e 2015. ....	107
Figura II.2 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto CD do coroamento, entre 1973 e 2015. ....	107
Figura II.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto DE do coroamento, entre 1973 e 2015. ....	108
Figura II.4 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto IV (bloco B-C) do coroamento, entre 1972 e 2015. ....	108
Figura II.5 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto III (bloco C-D) do coroamento, entre 1972 e 2015. ....	109
Figura II.6 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto II (bloco D-E) do coroamento, entre 1972 e 2015. ....	109
Figura II.7 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M1 (margem direita) do coroamento, entre 1997 e 2015.....	110
Figura II.8 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M2 (central) do coroamento, entre 1997 e 2015. ....	110
Figura II.9 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M3 (margem esquerda) do coroamento, entre 1997 e 2015.....	111
Figura II.10 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N1 (margem direita) do coroamento, entre 1998 e 2015. ....	111
Figura II.11 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N2 (central) do coroamento, entre 1998 e 2015. ....	112

Figura II.12 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N3 (margem esquerda) do coroamento, entre 1998 e 2015. ....	112
Figura II.13 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M3 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	113
Figura II.14 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M5 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	113
Figura II.15 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M6 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	114
Figura II.16 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M8 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	114
Figura II.17 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N3 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	115
Figura II.18 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N5 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	115
Figura II.19 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N6 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	116
Figura II.20 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N8 do coroamento, entre 1998 e 2016. ....	116
Figura II.21 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB4/5 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	117
Figura II.22 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB6 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	117
Figura II.23 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB7 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	118
Figura II.24 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN4 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	118

Figura II.25 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN5 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	119
Figura II.26 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN6 do coroamento, entre 1987 e 1992 .....	119
Figura II.27 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC4 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	120
Figura II.28 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC5 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	120
Figura II.29 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC6 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	121
Figura II.30 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN4 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	121
Figura II.31 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN5 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	122
Figura II.32 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN6 do coroamento, entre 2006 e 2017.....	122

(página deixada deliberadamente em branco)

# Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Grandes barragens portuguesas de alvenaria .....	9
Quadro 2.2 - Características da barragem de Guilhofrei .....	13
Quadro 2.3 - Características da barragem de Andorinhas .....	16
Quadro 2.4 - Características da barragem de Freigil .....	19
Quadro 2.5 - Características da barragem de Covão do Ferro .....	23
Quadro 2.6 - Propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias das barragens francesas (Royet et al., 2013).....	24
Quadro 4.1 - Valores médios do coeficiente de permeabilidade das diferentes secções da barragem do Covão do Ferro para os dois períodos analisados .....	49
Quadro 4.2 - Valores médios dos coeficientes de permeabilidade das alvenarias das barragens portuguesas em estudo, estimados a partir dos resultados obtidos na análise da percolação através do corpo das obras.....	50
Quadro 4.3 - Valores médios de permeabilidade de doze barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas .....	50
Quadro 5.1 - Agressividade das águas para os cimentos dos betões, argamassas e caldas de injeção, estimadas a partir do índice de agressividade $i = \text{pH} - \text{pH}_s$ .....	53
Quadro 5.2 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspecções realizadas entre 2004 e 2016 .....	55
Quadro 5.3 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspecções realizadas entre 2004 e 2016 .....	57
Quadro 5.4 - Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspecções realizadas entre 2005 e 2015 .....	59
Quadro 5.5 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspecções realizadas em 1988 e 1989 .....	60
Quadro 5.6 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspecções realizadas entre 2006 e 2015 .....	61

Quadro 5.7 - Valores estimados de massa dissolvida por efeito da lixiviação das argamassa de ligação devido apenas ao caudal repassado pelo corpo das obras.....	62
Quadro 6.1 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Guilhofrei devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento) .....	69
Quadro 6.2 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Guilhofrei. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias .....	70
Quadro 6.3 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Andorinhas devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento) .....	72
Quadro 6.4 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Andorinhas. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias .....	74
Quadro 6.5 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Freigil devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do NPA) .....	75
Quadro 6.6 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Freigil. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias ..	76
Quadro 6.7 - Valores médios dos deslocamentos da barragem do Covão do Ferro devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento).....	79
Quadro 6.8 - Valores médios dos deslocamentos da barragem do Covão do Ferro. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias.....	81
Quadro 6.9 - Valores estimados para o módulo de elasticidade médio das alvenarias das barragens portuguesas em estudo, obtidos através de modelos numéricos resolvidos com o programa FLAC 7.0.....	84
Quadro 6.10 - Valores médios do módulo de elasticidade de cinco barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas.....	84
Quadro 6.11 - Comparação dos resultados observados e estimados das barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias .....	85
Quadro I.1 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2004-05-17, com a água à cota 331,32 m .....	95
Quadro I.2 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2008-02-12, com a água à cota 328,50 m .....	95
Quadro I.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2010-04-13, com a água à cota 331,97 m .....	95

Quadro I.4 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2013-04-09, com a água à cota 332,80 m .....	96
Quadro I.5 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2016-04-05, com a água à cota 333,12 m .....	96
Quadro I.6 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2004-05-17, com a água à cota 331,32 m .....	96
Quadro I.7 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2006-12-05, com a água à cota 332,70 m .....	96
Quadro I.8 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2010-04-13, com a água à cota 331,97 m .....	97
Quadro I.9 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2013-04-09, com a água à cota 332,80 m .....	97
Quadro I.10 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2004-05-18, com a água à cota 187,80 m .....	97
Quadro I.11 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2008-02-13, com a água à cota 187,30 m .....	97
Quadro I.12 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2010-04-14, com a água à cota 188,10 m .....	97
Quadro I.13 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2016-04-05, com a água à cota 187,78 m .....	98
Quadro I.14 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2004-05-18, com a água à cota 187,80 m .....	98
Quadro I.15 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-12-06, com a água à cota 188,30 m .....	98
Quadro I.16 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2008-02-13, com a água à cota 187,30 m .....	98
Quadro I.17 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2010-04-14, com a água à cota 188,10 m .....	98
Quadro I.18 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2013-04-10, com a água à cota 188,00 m .....	99
Quadro I.19 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2016-04-05, com a água à cota 187,78 m .....	99
Quadro I.20 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2005-07-11, com a água à cota 312,90 m .....	99

Quadro I.21 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2007-03-27, com a água à cota 314,20 m .....	99
Quadro I.22 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2015-02-18, com a água à cota 316,20 m .....	100
Quadro I.23 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2005-07-11, com a água à cota 312,90 m.....	100
Quadro I.24 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2007-03-27, com a água à cota 314,20 m.....	100
Quadro I.25 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2015-02-18, com a água à cota 316,20 m.....	100
Quadro I.26 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-10-11, com a água à cota 1550,39 (3,90) m.....	100
Quadro I.27 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-10-30, com a água à cota 1568,89 (22,40) m.....	101
Quadro I.28 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-11-16, com a água à cota 1577,09 (30,60) m.....	101
Quadro I.29 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2008-06-16, com a água à cota 1566,99 (20,50) m.....	101
Quadro I.30 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2009-10-20, com a água à cota 1562,79 (16,30) m.....	101
Quadro I.31 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2010-05-17, com a água à cota 1569,29 (22,80) m.....	102
Quadro I.32 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2011-06-15, com a água à cota 1558,51 (12,02) m.....	102
Quadro I.33 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2012-11-06, com a água à cota 1575,29 (28,80) m.....	102
Quadro I.34 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2013-10-22, com a água à cota 1570,59 (24,10) m.....	102
Quadro I.35 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2015-09-22, com a água à cota 1565,43 (18,94) m.....	103
Quadro I.36 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-10-11, com a água à cota 1550,39 (3,90) m.....	103
Quadro I.37 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-10-30, com a água à cota 1568,89 (22,40) m....	103

Quadro I.38 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-11-16, com a água à cota 1577,09 (30,60) m.... 103

Quadro I.39 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2008-06-16, com a água à cota 1566,99 (20,50) m.... 103

Quadro I.40 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2011-06-15, com a água à cota 1558,51 (12,02) m.... 104

Quadro I.41 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2013-10-22, com a água à cota 1570,59 (24,10) m.... 104

Quadro I.42 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2015-09-22, com a água à cota 1565,43 (18,94) m.... 104

(página deixada deliberadamente em branco)

## Simbologia e notações

$A_i$	Área do elemento $i$
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica linear
$b_j$	Força mássica por unidade de volume
$c$	Coesão
$C$	Condutividade elétrica
CIGB	Comissão Internacional das Grandes Barragens
$d$	Densidade
$d_s$	Densidade da alvenaria seca
$d_h$	Densidade da alvenaria húmida
$d_h$	Deslocamento devido à pressão hidrostática
$d_j$	Deslocamento total no período $j$
$d_t$	Deslocamento devido aos efeitos do tempo
$d_T$	Deslocamento devido à variação de temperatura
DBB	Departamento de Barragens de Betão
$D_{ijkl}$	Matriz de elasticidade
$\Delta H$	Variação de pressão em altura de água equivalente
$\Delta T$	Variação de temperatura
$E$	Módulo de elasticidade
EDF	Equação de diferenças finitas
EDP	Energias de Portugal
EDPs	Equações de derivadas parciais
ELT	Erro local de truncamento
$\epsilon_{ii}(j)$	Extensão linear do elemento $j$
$\epsilon_{ii,med}$	Extensão média
$\epsilon_{v,med}$	Extensão volumétrica média
$\epsilon_{ij}$	Tensor das deformações
$\epsilon_0$	Extensão imposta
$\epsilon_{médio}$	Extensão média
<i>FISH</i>	<i>FLACish</i>
FLAC	Fast lagrangian analysis of continua
$G$	Módulo de distorção
$h$	Diferença de cotas entre o nível de água a montante e a jusante da barragem
$i$	Índice de agressividade
$i$	Gradiente hidráulico
INAG	Instituto Nacional da Água
$k$	Coefficiente de permeabilidade
$k_0$	Constante dependente do valor dos efeitos $d_h$ , $d_T$ e $d_t$
$l$	Comprimento percorrido pelo escoamento
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNG	Linha de nivelamento geométrico de precisão

## *Simbologia e notações*

$M$	Número de elementos da discretização do domínio
$m_a$	Massa total lixiviada anualmente
MEBAD	Modelação de estruturas de blocos sob ações dinâmicas
$m_T$	Massa total da barragem
$n$	Período em anos considerado na análise dos efeitos da lixiviação
NGA	Núcleo de Geodesia Aplicada
NMC	Nível de máxima cheia
NO	Núcleo de Observação
NPA	Nível de pleno armazenamento
$\phi'$	Ângulo de atrito
pH	Potential of hydrogen
pHs	pH de saturação
PVC	Polyvinyl Chloride
$q$	Caudal infiltrado por metro linear
$q_j$	Força distribuída por unidade de superfície
$Q$	Caudal total infiltrado
$R_c$	Resistência à compressão
$R_t$	Resistência à tracção
$u_{ij}$	Deslocamento (i,j)
$v_i$	Velocidade de escoamento no ponto i
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$r_j$	Valor residual, diferença do valor calculado e observado
$t$	Tempo absoluto
$t'$	Tempo em dias num ano
TSD	Teor de sais dissolvidos
$\sigma_{ij}$	Tensor das tensões

# 1. Considerações iniciais

## 1.1 Interesse e enquadramento do tema

A construção de barragens gravidade de alvenaria de pedra, com apoio de análise científica e estudo das tensões a que estas obras estão sujeitas, remonta à segunda metade do século XIX. Em Portugal, as primeiras barragens de alvenaria de pedra, construídas com conhecimentos sólidos de engenharia, datam do início do século XX. Muitas destas barragens de alvenaria já sofreram, entretanto, obras de modificação e/ou reabilitação, devido à necessidade de se corrigirem algumas deficiências da conceção inicial, tanto na vertente estrutural como nos aspetos hidráulicos. No entanto, o principal motivo para a reabilitação destas obras deve-se à afetação das condições de segurança estrutural e hidráulica por deterioração e envelhecimento da estrutura. Para as barragens de alvenaria, o cenário de deterioração mais relevante está, em regra, relacionado com os efeitos nefastos da infiltração da água pelo corpo da barragem. A infiltração dá-se principalmente pelas juntas da alvenaria, mas também por fendas existentes devido a efeitos térmicos, uma vez que este tipo de barragens, por norma, não tem juntas de contração. A percolação de água no corpo e na fundação das barragens de betão e alvenaria provoca a dissolução e transporte dos carbonatos dos ligantes, originando a lixiviação destes materiais cimentícios. A magnitude destes fenómenos é potencializada pelo efeito da erosão, que por sua vez é função da velocidade de escoamento. Este aspeto é particularmente importante nas cortinas de impermeabilização das fundações de barragens e no corpo das barragens de alvenaria de pedra. A lixiviação dos materiais cimentícios tem como consequência a deterioração progressiva das obras, através da perda de rigidez e resistência. A infiltração da água pelo corpo da barragem provoca também pressões internas. Estas pressões internas influenciam negativamente o estado de equilíbrio da estrutura, podendo mesmo colocar em causa o equilíbrio global da barragem, caso se verifiquem no plano de fundação, onde assumem a forma de subpressões (Bretas, 2015). A realização do presente trabalho foi enquadrada no projeto de investigação do LNEC “Modelação de estruturas de blocos sob ações dinâmicas”, com o acrónimo MEBAD, na vertente respeitante à avaliação das propriedades estruturais e da deterioração das obras.

## 1.2 Objetivos da dissertação

Neste trabalho pretende-se quantificar a lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens gravidade de alvenaria de pedra, a partir de análises expeditas das águas realizadas nas inspeções periódicas às obras, bem como estabelecer correlações entre este efeito e a permeabilidade média do corpo das obras e, ainda, avaliar os seus efeitos estruturais, designadamente em termos de perda de rigidez e de progressão da deterioração. A análise recorrerá aos resultados da observação das obras, designadamente aos deslocamentos, aos caudais infiltrados e às características físico-químicas das águas, na elaboração de modelos planos de percolação e estruturais, representativos do comportamento dos perfis transversais das obras. Devido às suas capacidades, os modelos foram analisados pelo programa comercial FLAC, na versão 7.0. Utilizaram-se como casos de estudo as quatro barragens de alvenaria portuguesas para

as quais se dispõe dos elementos de observação requeridos, que são as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro.

### 1.3 Abordagem adotada no desenvolvimento do trabalho

Para se alcançarem os objetivos deste trabalho, atrás enunciados, cumpriram-se as seguintes etapas sucessivas:

- i. Estudo da história e das características das barragens gravidade de alvenaria de pedra, incluindo uma pesquisa bibliográfica exaustiva;
- ii. Recolha de elementos sobre as características, a construção, as obras de melhoramento/reabilitação e a exploração das barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro;
- iii. Estudo dos fenómenos físicos envolvidos e das equações governativas do escoamento em meios contínuos permeáveis e do comportamento estrutural de corpos deformáveis;
- iv. Desenvolvimento de um algoritmo para a elaboração de modelos no programa FLAC, através da construção de malhas de cálculo, para representar o comportamento das quatro barragens em estudo;
- v. Análise da percolação e determinação da permeabilidade média das quatro barragens, considerando os modelos criados;
- vi. Quantificação simplificada da lixiviação das argamassas de ligação a partir dos caudais infiltrados e das características das águas (condutividade elétrica, pH e índice de agressividade);
- vii. Interpretação quantitativa dos deslocamentos observados nas obras, para separação dos efeitos devidos às principais causas (pressão hidrostática, variações anuais de temperatura e deterioração estrutural progressiva);
- viii. Determinação do módulo de elasticidade médio do corpo das quatro barragens, considerando os deslocamentos devidos à pressão hidrostática;
- ix. Desenvolvimento de um algoritmo para a simulação dos efeitos estruturais da lixiviação das argamassas de ligação e sua aplicação aos quatro casos de estudo;
- x. Análise crítica dos resultados obtidos e conclusões sobre o trabalho realizado.

### 1.4 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em sete capítulos, sendo complementada com dois anexos.

No presente capítulo (capítulo 1) faz-se referência ao interesse do tema e ao seu enquadramento no âmbito da engenharia de barragens, definem-se os objetivos da dissertação, refere-se a abordagem adotada no desenvolvimento do trabalho e descreve-se a organização da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma resenha geral sobre as barragens de alvenaria e justifica os casos de estudo escolhidos. Faz-se um enquadramento histórico deste tipo de obras e refere-se a evolução das suas formas estruturais e dos materiais e técnicas construtivas utilizadas ao longo dos tempos. Apresentam-se as barragens de alvenaria existentes no território nacional e faz-se um resumo das características das quatro barragens utilizadas como casos de estudo. No final apresentam-se elementos bibliográficos relevantes sobre as propriedades dos materiais das barragens de alvenaria de pedra, que permitirão enquadrar os resultados obtidos no presente trabalho.

O capítulo 3 apresenta as metodologias de análise da percolação e da análise estrutural que foram seguidas no estudo das barragens de alvenaria de pedra. Apresentam-se as hipóteses inerentes ao escoamento em meios contínuos, referindo-se a ligação à porosidade e à permeabilidade dos materiais, e refere-se a física dos corpos deformáveis. Faz-se referência às equações governativas dos fenómenos físicos e apresentam-se, genericamente, os algoritmos computacionais em que assenta o programa de cálculo automático utilizado (FLAC 7.0). Por fim é apresentado um

exemplo de teste do programa de cálculo automático, para mostrar o seu interesse para o trabalho em apreço.

O capítulo 4 diz respeito à análise da percolação através do corpo das barragens de alvenaria, para se estimar a sua permeabilidade média em função dos valores dos caudais infiltrados e quantificar as velocidades de percolação.

No capítulo 5 apresenta-se a quantificação simplificada da lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de alvenaria de pedra, avaliada através da dissolução média dos materiais cimentícios, a partir dos caudais infiltrados e das características físico-químicas das águas das albufeiras e das águas infiltradas.

O capítulo 6 respeita à interpretação dos deslocamentos observados ao longo do tempo nas barragens de alvenaria. Os modelos estruturais são ajustados em função dos efeitos devidos à pressão hidrostática, sendo de seguida utilizados para estimar os efeitos estruturais devidos à deterioração progressiva das alvenarias.

No último capítulo (capítulo 7) apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e perspetiva-se o desenvolvimento futuro dos estudos relativos à avaliação da deterioração das barragens de alvenaria de pedra em condições de serviço.

O anexo I inclui os quadros relativos aos resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água das albufeiras e infiltradas pelo corpo das obras, aquando da realização pelo LNEC das inspeções regulares às barragens, e o anexo II apresenta, sob a forma gráfica, os resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos horizontais observados por triangulação geodésica e dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico de precisão, em campanhas realizadas com periodicidade anual.

(página deixada deliberadamente em branco)

## 2. Resenha sobre barragens de alvenaria e casos de estudo escolhidos

### 2.1 Generalidades sobre barragens de alvenaria

#### 2.1.1 Aspetos históricos

As primeiras barragens construídas pelo homem eram formadas por estruturas simples de terra, pedras e troncos, tendo surgido da necessidade de armazenar água, principalmente em regiões secas. As barragens mais antigas de que há conhecimento foram construídas na atual Jordânia, por volta de 3000 a.C., tendo a maior 4 m de altura e 80 m de comprimento. Seguiram-se mais tarde as barragens do período do império egípcio, como a barragem de Sadd-el-Kafara, localizada no Cairo, construída em 2600 a.C., com 14 m de altura e 113 m de desenvolvimento. Na Europa, e em particular na Península Ibérica, as barragens mais antigas são do período do império romano. Os métodos de construção das barragens romanas derivaram das técnicas herdadas dos egípcios, existindo atualmente ruínas ou vestígios de vinte grandes barragens, mas estão documentadas cerca de oitenta. Mantiveram a utilização dos materiais tradicionais, como a terra e a pedra. A contribuição mais significativa dos romanos foi a introdução do uso das argamassas de cal hidráulica como ligante dos blocos de alvenaria de pedra.

As estruturas das obras de alvenaria de pedra eram formadas, em regra, por barragens gravidade com secção transversal trapezoidal, barragens gravidade reforçadas por contrafortes ou barragens compostas por soluções mistas com paredes de alvenaria dotadas de aterros, no interior ou nos taludes exteriores.

A barragem de Alcantarilla, localizada a 20 km de Toledo, com 17 m de altura e 557 m de desenvolvimento, construída, provavelmente, no século II, é a barragem romana existente mais antiga da Península Ibérica. Esta barragem tem paramentos de alvenaria, com o interior preenchido por aterro, e taludes exteriores de aterro (Figura 2.1 e Figura 2.2).

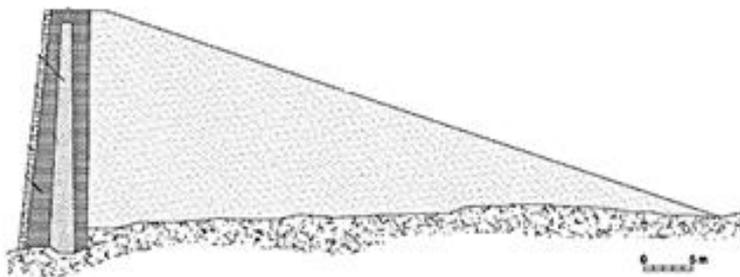


Figura 2.1 - Perfil transversal da barragem de Alcantarilla (Aranda Gutiérrez, 2003)



**Figura 2.2 - Ruínas do muro de alvenaria da barragem de Alcantarilla (Aranda Gutiérrez et al., 2003)**

No território que hoje é Portugal há vestígios de inúmeras obras do período romano (INAG, 2001). Dentre elas deve ser destacada a barragem de Olisipo, com 8 m de altura e 64 m de comprimento, formada por um conjunto de contrafortes, sendo a mais alta que se conhece (Figura 2.3). A barragem localiza-se na ribeira de Carenque, próximo de Belas, tendo provavelmente sido construída no século III, dando início ao aqueduto para abastecimento de água a Olisipo, hoje Lisboa. O volume de armazenamento seria de cerca de  $1,1 \times 10^5 \text{ m}^3$  e a albufeira teria um perímetro de cerca de 1,9 km e ocuparia uma área de 4,7 ha. A barragem apenas deixou de ser utilizada na altura da construção do Aqueduto das Águas Livres, já no século XVII (Bretas, 2013).



**Figura 2.3 - Ruínas da barragem de Belas (Firmino, 2011)**

Depois da queda do império romano, a tipologia de barragens e os seus métodos de construção não se alteraram. No sul da Europa construíram-se, predominantemente, barragens de alvenaria, ao passo que no norte da Europa foram construídas maioritariamente obras de aterro. Até ao século XV, na Europa a água represada foi utilizada para irrigação e abastecimento às populações, mas as barragens tiveram também um papel importante no controlo de cheias. Com a chegada do século XIX, as barragens passaram a ter também um papel importante na produção de energia, em especial para apoio à exploração e tratamento de minérios. Para além

deste objetivo, outras atividades económicas justificaram o incremento da construção de barragens, nomeadamente a pesca e o estabelecimento de canais de navegação. Até esta época manteve-se a tradição de construção romana, ainda que tenha havido uma tendência para a redução das secções transversais das obras.

Em 1853 J. Augustin Tortene de Sazilly publicou, em *Annales des Ponts et Chaussées*, a obra "*Note sur un type de profil d'égale résistant pour les murs de réservoirs d'eau*", que é considerada o primeiro documento técnico-científico nos campos do projeto e construção de barragens. Muitas outras publicações já haviam sido feitas, mas não eram mais do que registos das soluções de construção utilizadas nas diferentes épocas, sem definição de critérios objetivos de projeto. Segundo Sazilly, a secção da barragem deve ser projetada de modo a evitar a rotura por esforços de compressão ou deslizamento, não apenas na ligação da barragem com a fundação, mas também ao longo de todo o seu perfil.

Outra contribuição fundamental foi dada por S. Rankine em 1872, com a publicação do artigo no *The Engineer*, com o título "*Report on the design and construction of masonry dams*". Neste artigo, Rankine confirma a validade das teorias anteriores de Sazilly e também de Delocre, que havia anos antes desenvolvido as teorias de Sazilly, sendo que a única diferença consistiu no uso de diferentes valores limite de tensão para casos de carga extrema. Rankine salientou também a importância da escolha e tratamento das fundações, estipulando que todas as falhas ou vazios fossem preenchidos com agregados ligados por argamassas de cal hidráulica.

Em 1895 a barragem de Bouzey, com 23 m de altura e 525 m de comprimento, colapsou devido aos efeitos das subpressões, que até à data eram desprezados no projeto estrutural, causando oitenta e cinco vítimas mortais. Este acidente teve um grande impacto no projeto e construção de barragens, obrigando à redefinição dos critérios de projeto. Ainda em 1895 M. Lévy publicou na *Académie des Sciences* o artigo intitulado "*Quelques considérations sur la construction de grands barrages*", no qual propôs que a tensão de compressão em cada ponto da face de montante deveria ser igual ou superior à pressão da água neste ponto. De facto, além dos problemas da estabilidade da secção, as fissuras podem ocorrer devidos a outras causas, como efeitos térmicos, tendo este novo critério acautelado esses efeitos. Como resultado, um diagrama de subpressões triangular ou trapezoidal, dependendo do nível da água a jusante, deveria ser adotado para qualquer secção horizontal da barragem, incluindo a superfície de contacto entre a barragem e a fundação. O uso do diagrama de subpressões triangular proposto por Lévy tem tido uma utilização generalizada desde então, mas, na presença de um sistema de drenagem, o diagrama de subpressões passa a ter uma configuração bi-linear, devido à redução significativa da pressão na linha dos drenos.

No início do século XX verificaram-se enormes avanços tecnológicos em todos os domínios da engenharia, tendo como consequência, no caso das barragens, a evolução para formas mais esbeltas e complexas, devido aos conhecimentos crescentes de mecânica estrutural, à generalização do uso do betão como material de construção e à necessidade de redução de custos. As barragens de contrafortes passaram a fazer uma clara distinção entre os elementos de montante para retenção de água e os de jusante com função estrutural (contrafortes). Em 1905, G. Wisner e E. Wheeler deram início aos estudos para entender melhor a distribuição de tensões em barragens abóbada (Bretas, 2012).

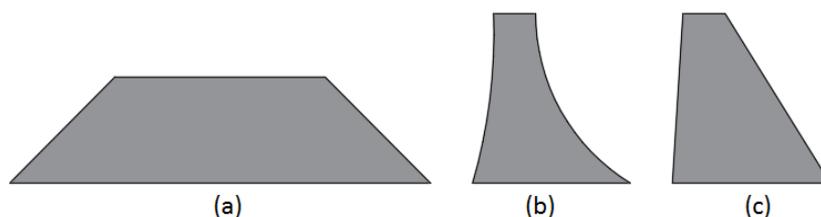
No século XX e nos primeiros anos do presente século foram projetadas e construídas milhares de barragens em todo o mundo, para satisfação de diferentes necessidades. Devido ao seu custo, nas últimas décadas apenas se têm construído barragens de alvenaria de pedra em situações e regiões específicas, mas existe um parque significativo de obras de alvenaria em exploração que é necessário preservar, daí a importância da realização de estudos sobre estas obras.

### 2.1.2 Formas das obras

O projeto, as formas e a construção de barragens gravidade de alvenaria são dependentes dos condicionamentos topográficos, geológicos, geotécnicos, hidrológicos, hidráulicos e ambientais. São calculadas para resistir, pelo seu peso próprio, às forças exercidas pela água, sendo assim aproximadamente triangular a secção transversal típica de uma barragem gravidade. Geralmente

o traçado em planta é reto ou tem uma ligeira curvatura com concavidade voltada para jusante (Batista, 2014). Contudo, há estruturas com planta poligonal, devidos a variados condicionamentos de projeto e construção.

Inicialmente, as secções das barragens gravidade de alvenaria eram generosas e robustas, ou seja, as larguras do coroamento e da base tinham dimensões maiores que a sua altura (Figura 2.4a). Com a evolução da engenharia de barragens, as formas dos perfis transversais passaram a ser aproximadamente triangulares, onde a definição dos paramentos destes perfis é linear ou tem uma ligeira curvatura no seu desenvolvimento em altura. A largura da base do perfil é, em regra, da ordem de grandeza da altura (Figura 2.4b e Figura 2.4c).



**Figura 2.4 - Evolução do perfil transversal das barragens de alvenaria: (a) usado nos primórdios; (b) forma com otimização teórica; (c) forma mais comum**

As secções transversais triangulares atuais têm, em regra, valores constantes dos jorramentos nos paramentos de montante e de jusante, ao longo do desenvolvimento da obra.

As barragens gravidade de alvenaria também podem ser classificadas conforme a sua geometria em planta. Como referido, o eixo planimétrico das barragens de alvenaria é reto ou tem uma ligeira curvatura com concavidade voltada para jusante, mas há barragens com planta poligonal, embora menos comuns, sendo em geral constituídas por um conjunto de troços ou arcos com concavidade voltada para jusante, apoiados em trechos mais robustos ou em contrafortes (Figura 2.5).



**Figura 2.5 - Barragem da Lagoa Comprida, estrutura de planta poligonal localizada na serra da Estrela (EDP, 2016)**

### 2.1.3 Materiais e técnicas construtivas

Os materiais utilizados na construção das barragens de alvenaria variam, dependendo da localização da obra e das matérias primas existentes nas proximidades. Em geral, na construção das barragens de alvenaria da última geração (primeira metade do século XX), os paramentos e o coroamento são executados com alvenaria aparelhada enquanto que o seu interior é preenchido

com alvenaria a granel. A utilização da alvenaria aparelhada (Figura 2.6) permite a execução de superfícies uniformes e bem acabadas, aumentando a sua resistência. A alvenaria a granel do interior é formada por blocos de grandes dimensões colocados de forma a minimizar os volumes a preencher pela argamassa de ligação. Nas últimas décadas utilizou-se argamassa de cimento para ligação dos blocos de pedra, mas nas barragens mais antigas foi utilizada argamassa de cal (Charles, 1916).

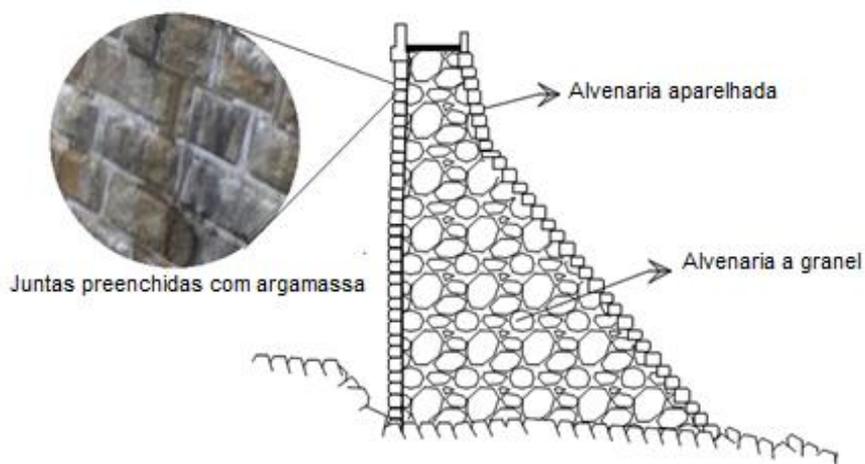


Figura 2.6 - Técnicas e materiais mais utilizados na construção das barragens de alvenaria.

## 2.2 Barragens de alvenaria portuguesas

De acordo com o inventário das grandes barragens portuguesas<sup>1</sup>, existem presentemente em Portugal doze grandes barragens de alvenaria (Quadro 2.1), a maior parte delas em exploração.

As obras foram construídas nas décadas de 10 a 50 do século XX e são estruturas do tipo gravidade, todas de alvenaria de granito, exceto a barragem da Tapada do Lousal (a albufeira desta barragem tem estado vazia nas últimas décadas). Não se refere a barragem de Margalha, construída com alvenaria de xisto num afluente do rio Guadiana junto a Mourão, que ficou parcialmente submersa pela albufeira da barragem de Alqueva em 2003.

As barragens da serra da Estrela (Lagoa Comprida, Covão do Ferro e Vale do Rossim) fecham covões de origem glaciária e são obras de gravidade com ligeira curvatura em planta, para atender à topografia local, sendo as duas primeiras constituídas por vários arcos e a última por um único. A barragem de Penide é do tipo barragem descarregadora e é munida de comportas de dimensão apreciável face à altura da obra.

As restantes obras apresentam as formas habituais das estruturas de gravidade, com a secção transversal de paramento de montante vertical ou ligeiramente inclinado e o paramento de jusante de inclinação próxima da unidade, sendo a obra de maior altura a barragem de Guilhofrei.

Quadro 2.1 - Grandes barragens portuguesas de alvenaria

Nome	Curso de água	Ano de construção	Altura máxima acima da fundação (m)
Andorinhas	Rio Ave	1945	25

<sup>1</sup> A Comissão Internacional das Grandes Barragens (CIGB) define como grandes barragens as obras com mais de 15 m de altura, ou com uma altura entre 10 m e 15 m desde que se verifique uma das seguintes condições: albufeira de volume superior a 1 hm<sup>3</sup>; comprimento do coroamento superior a 500 m; capacidade do descarregador de cheias superior a 2000 m<sup>3</sup>/s; condições de fundação especialmente difíceis; projeto fora do comum.

Burgães	Rio Caima	1940	30
Covão Ferro	Ribeira de Alforfa	1956 (a)	35 (b)
Freigil	Rio Cabum	1955	19,7 (c)
Guilhofrei	Rio Ave	1938	49
Lagoa Comprida	Ribeira da Carriça	1966 (d)	29
Penedo Redondo	Rio Ocreza	1935	21
Penide	Rio Cávado	1951 (e)	18 (f)
Poio	Ribeira de Nisa	1932	18
Póvoa	Ribeira de Nisa	1928	32
Tapada do Lousal	Rib. de Espinhaço de Cão	(g)	15,7
Vale do Rossim	Ribeira da Fervença	1956	27

- (a) A construção iniciou-se em 1935, tendo tido vários alteamentos, o último concluído em 1956
- (b) A altura de 35 m refere-se à diferença de cotas entre o piso do coroamento (cota 1579,24 m) e a superfície média inferior da fundação, a jusante; entre o piso do coroamento e a superfície média inferior da fundação, a montante, a altura é de 32,5 m
- (c) A altura de 19,7 m refere-se ao piso do passadiço sobre o descarregador; até à crista do descarregador a altura é de 16,9 m
- (d) A construção iniciou-se em 1912, tendo tipo vários alteamentos, o último concluído em 1966
- (e) Trata-se de uma obra de betão ciclópico totalmente revestida por alvenaria de blocos de granito
- (f) A altura de 18 m refere-se ao piso do passadiço sobre o descarregador (cota 21 m, estando a superfície média inferior da fundação próxima da cota 3 m)
- (g) Num estudo de 1947, anexo ao pedido de legalização da barragem cuja licença foi passada em 1948, que inclui desenhos de definição da obra e o cálculo da máxima cheia e da capacidade de vazão do descarregador, refere-se que a construção da barragem "... data de mais de quarenta anos ...", pelo que terá sido construída no início do século XX

A construção das barragens de alvenaria seguiu, em regra, critérios idênticos, alguns dos quais importa referir, por serem relevantes para os problemas abordados: utilizou-se pedra a granel no seu corpo e pedra aparelhada nos paramentos; como ligantes foram utilizadas, no corpo da barragem, inicialmente argamassas de cal e depois de cimento; o fechamento das juntas entre as alvenarias, tanto a montante como a jusante, foi feito com argamassas de cimento; apenas algumas delas são dotadas de juntas de contração; raramente foram previstas, de início, galerias de drenagem e de visita (Mora Ramos, 2000).

## 2.3 Características das barragens consideradas no estudo

### 2.3.1 Considerações gerais

Como referido no primeiro capítulo, no presente trabalho pretende-se averiguar a existência de um padrão de comportamento ao longo do tempo das barragens de alvenaria de pedra no que respeita à sua deterioração estrutural devida à lixiviação das argamassas de ligação dos blocos causada pela percolação de água pela alvenaria. Assim, as barragens a selecionar como casos de estudo com interesse devem dispor de informação, fornecida pelos respetivos sistemas de observação, relativa à percolação de água pela estrutura de alvenaria, às características da água que se infiltra (água da albufeira) e da água repassada, bem como à resposta estrutural, designadamente em termos de deslocamentos horizontais e verticais. Estão nestas condições apenas as barragens de Guilhofrei, Andorinas, Freigil e Covão do Ferro, todas em exploração por empresas do grupo EDP, pelo que foram as escolhidas. De seguida apresentam-se as principais características destas quatro barragens.

### 2.3.2 Barragem de Guilhofrei

A barragem de Guilhofrei (Figura 2.7), no rio Ave, no concelho de Vieira do Minho, é do tipo gravidade de alvenaria de granito, com ligeira curvatura em planta, construída entre 1936 e 1938, segundo projeto de A. Stucky.

Trata-se de uma barragem com uma altura máxima de 49 m acima da fundação e cerca de 190 m de desenvolvimento do coroamento.

O coroamento está à cota 334,75 m, o nível de pleno armazenamento da albufeira (NPA), que coincide com o nível de máxima cheia (NMC), é à cota 333,35 m. O volume da albufeira, para a água à cota do NPA, é de cerca de 21,2 hm<sup>3</sup>. A água é conduzida para a central, a jusante, através de uma conduta forçada. A restituição é feita diretamente para um canal, que faz a adução à central do Ermal.

A barragem dispõe de um descarregador de cheias, situado na zona central da estrutura, constituído por dois vãos munidos de comportas, com uma capacidade de vazão de 445 m<sup>3</sup>/s para a cota de pleno armazenamento. A descarga de fundo localiza-se no contraforte central, que separa os dois vãos do descarregador, sendo constituída por uma conduta metálica circular, dotada de uma válvula borboleta de serviço a jusante e de uma comporta ensecadeira a montante.

A barragem é dotada de seis juntas de contração, identificadas pelas letras A a F, localizando-se o descarregador de cheias no bloco central, limitado pelas juntas C e D.

Na zona central da barragem existe uma galeria geral de drenagem, localizada a cotas baixas do lado de montante, com acesso através de uma galeria transversal horizontal que se inicia no paramento de jusante, do lado da margem direita (bloco B-C) (LNEC, 2016b).



Figura 2.7 - Barragem de Guilhofrei (visita à barragem em fevereiro de 2017)

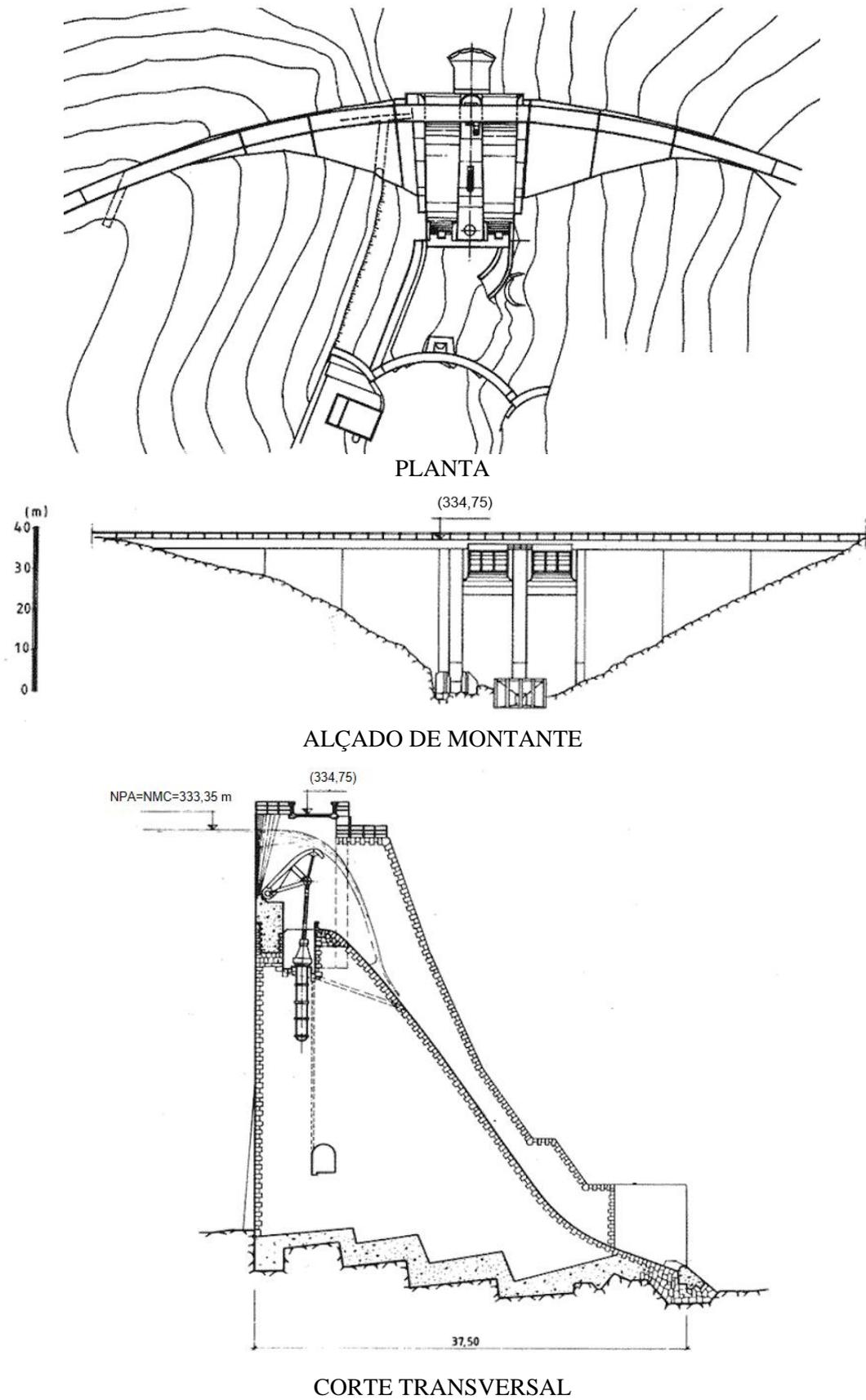


Figura 2.8 - Barragem de Guilhofrei. Planta, alçado de montante e corte transversal

No Quadro 2.2 resumem-se as principais características da barragem de Guilhofrei.

**Quadro 2.2 - Características da barragem de Guilhofrei**

BARRAGEM	Localização	Distrito	Braga
		Concelho	Vieira do Minho
		Local	Guilhofrei
		Bacia hidrográfica	Ave
		Linha de água	Rio Ave
	Utilização	Produção de energia	
	Tipo estrutural	Gravidade de alvenaria de granito	
	Altura acima da fundação	49 m	
	Cota do coroamento	334,75 m	
	Fundação	Granito	
	Volume de alvenaria	55000 m <sup>3</sup>	
	Projetista	A.Stucky	
	Construtor	Joaquim Moreira Ramalhão	
	Ano de projeto	-	
Ano de conclusão	1938		
ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA)		333,35 m
	Nível de máxima cheia (NMC)		333,35 m
	Área inundada no NPA		1630 x 1000 m <sup>2</sup>
	Capacidade total		21200 x 1000 m <sup>3</sup>
	Capacidade útil		21080 x 1000 m <sup>3</sup>
DESCARREGADOR DE CHEIAS	Localização	No corpo da barragem (bloco central C-D)	
	Tipo de controlo	Controlado	
	Tipo de descarregador	Sobre a barragem	
	Cota da crista da soleira	330,60 m	
	Desenvolvimento da soleira	18 m (dois vãos, 9 m cada)	
	Dissipação de energia	Bacia de dissipação	
	Comportas	Duas comportas de charneira	
	Caudal máximo	445 m <sup>3</sup> /s	
DESCARGA DE FUNDO	Localização	Talvegue, através da barragem	
	Secção da conduta	Diâmetro de 2,0 m	
	Controlo a montante	Comporta ensecadeira	
	Controlo a jusante	Válvula borboleta	
	Dissipação de energia	Bacia de dissipação	
	Caudal máximo	-	

### 2.3.3 Barragem de Andorinhas

A barragem de Andorinhas (Figura 2.10), no rio Ave, no concelho de Póvoa de Lanhoso, é do tipo gravidade de alvenaria de granito, com uma altura máxima de 25 m acima da fundação e cerca de 107 m de desenvolvimento do coroamento, projetada por A. Stucky e cuja construção ficou concluída em 1945. A geometria do paramento de jusante, na zona central, foi adaptada para servir de soleira descarregadora. A água armazenada é conduzida por um canal de 2,6 km de extensão até uma câmara de carga e daí para a central da Senhora do Porto, por conduta forçada.



Figura 2.9 - Barragem de Andorinhas (LNEC, 2016c)

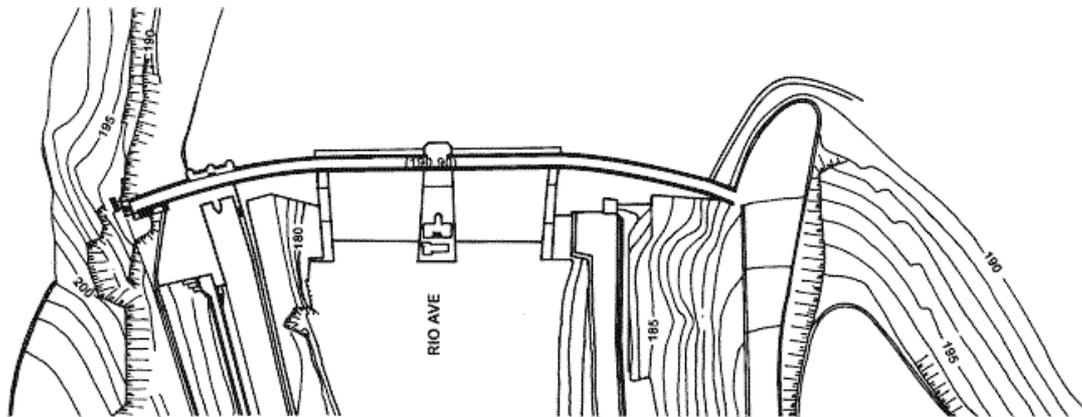
A barragem tem eixo reto no seu trecho central, onde está inserido o descarregador de cheias em lâmina livre, e uma ligeira curvatura para jusante nos trechos laterais.

O coroamento está à cota 191,2 m, o nível de pleno armazenamento (NPA), que coincide com a crista do descarregador, situa-se à cota 187,75 m, e o nível de máxima cheia (NMC) é à cota 189,1 m. O volume da albufeira para a água à cota do NPA é de cerca de 1,2 hm<sup>3</sup>.

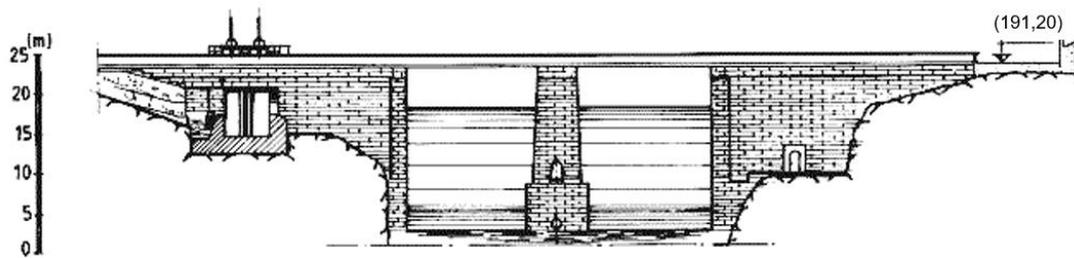
O descarregador tem 2 vãos, cada um com 16,5 m de largura, e permite descarregar um caudal máximo de 450 m<sup>3</sup>/s. A descarga de fundo localiza-se no eixo do contraforte central que separa os dois vãos do descarregador, sendo constituída por uma conduta com 1,6 m de diâmetro, controlada a montante e a jusante. O caudal máximo que pode escoar é de 35 m<sup>3</sup>/s.

A tomada de água localiza-se na margem direita, tendo dois vãos controlados por comportas planas.

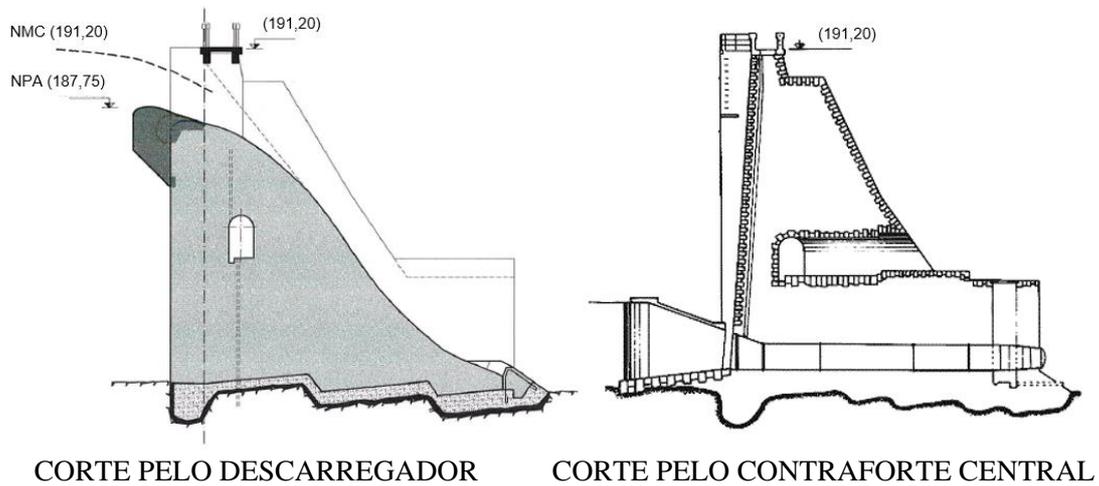
A barragem foi construída com duas juntas de contração, localizadas do lado exterior dos muros laterais do descarregador de cheias (LNEC, 2016a).



PLANTA



ALÇADO A JUSANTE



CORTE PELO DESCARREGADOR

CORTE PELO CONTRAFORTE CENTRAL

Figura 2.10 - Barragem de Andorinhas. Planta, alçado de jusante e cortes transversais

No Quadro 2.3 resumem-se as principais características da barragem de Andorinhas.

**Quadro 2.3 - Características da barragem de Andorinhas**

BARRAGEM	Localização	Distrito	Braga
		Concelho	Póvoa do Lanhoso
		Local	Andorinhas
		Bacia hidrográfica	Ave
		Linha de água	Rio Ave
	Utilização	Produção de energia	
	Tipo estrutural	Gravidade de alvenaria de granito	
	Altura acima da fundação	25 m	
	Cota do coroamento	191,20 m	
	Fundação	Granito	
	Volume de alvenaria	12000 m <sup>3</sup>	
	Projetista	A.Stucky	
	Construtor	Joaquim Moreira Ramalhão	
	Ano de projeto	1941	
Ano de conclusão	1945		
ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA)	187,75 m	
	Nível de máxima cheia (NMC)	189,10 m	
	Área inundada no NPA	210 x 1000 m <sup>2</sup>	
	Capacidade total	1200 x 1000 m <sup>3</sup>	
	Capacidade útil	-	
DESCARREGADOR DE CHEIAS	Localização	No corpo da barragem	
	Tipo de controlo	Livre	
	Tipo de descarregador	Sobre a barragem	
	Cota da crista da soleira	187,75 m	
	Desenvolvimento da soleira	33 m	
	Dissipação de energia	Bacia de dissipação	
	Caudal máximo	450 m <sup>3</sup> /s	
DESCARGA DE FUNDO	Localização	Talvegue, através da barragem	
	Secção da conduta	Diâmetro de 1,6 m	
	Controlo a montante	Comporta plana tipo vagão	
	Controlo a jusante	Válvula borboleta	
	Dissipação de energia	Bacia de dissipação	
	Caudal máximo	35 m <sup>3</sup> /s	

### 2.3.4 Barragem de Freigil

A barragem de Freigil, que integra o aproveitamento hidroelétrico do rio Cabrum (afluente do rio Douro, na margem esquerda), no concelho de Cinfães, é uma barragem do tipo gravidade em alvenaria de granito, com o paramento de montante vertical e o de jusante com uma inclinação de 1,0(v):0,85(h).

Foi construída a partir da sobrelevação de um antigo açude, também do tipo gravidade e com um perfil transversal tipo semelhante.

O paramento de jusante da barragem serve como soleira descarregadora em todo o desenvolvimento, pelo que é revestido com betão. O coroamento desenvolve-se segundo dois alinhamentos retos, formando entre si um ângulo de 160°, com a concordância central em arco de círculo com cerca de 15 m de desenvolvimento, tendo um comprimento total de cerca de 63 m.



Figura 2.11 - Barragem de Freigil (LNEC, 2010)

O corpo da barragem é constituído por alvenaria de granito argamassada, que terá sido construída com pedras de dimensão significativa, enchendo-se os espaços com pedras de menores dimensões do que as primeiras. As juntas entre blocos do paramento de montante têm sido objeto de intervenções regulares, através da aplicação de argamassas cimentícias de produtos à base de resinas, para garantir a sua estanquidade.

No local da barragem aflora granodiorito porfiroide biotítico, de base média, com fenocristais dispersos de feldspatos.

O descarregador de cheias é do tipo frontal não controlado e possui a crista localizada cerca da cota 316,9 m, que corresponde ao nível de pleno armazenamento. Tem uma capacidade de vazão máxima de 400 m<sup>3</sup>/s, correspondente a um período de retorno de 1000 anos. A cota de água na albufeira para este caudal é de 319,2 m. Está dividido em 12 vãos desiguais por pilares que suportam o passadiço com a largura de 1,6 m, à cota 319,7 m. Tanto os pilares como o tabuleiro são de betão armado. A descarga de fundo, com uma secção de cerca de 0,8 x 0,8 m<sup>2</sup> e soleira de entrada à cota 302,0 m, é revestida com lajes de granito e dotada de uma comporta a montante.

A albufeira possui um volume de armazenamento bruto da ordem dos 140.000 m<sup>3</sup> e submerge uma área de 3,3 ha ao nível de pleno armazenamento (316,9 m). A água armazenada é conduzida por um canal com 455 m de desenvolvimento até uma câmara de carga, e daí para a central de Freigil por conduta forçada (EDP, 2006).

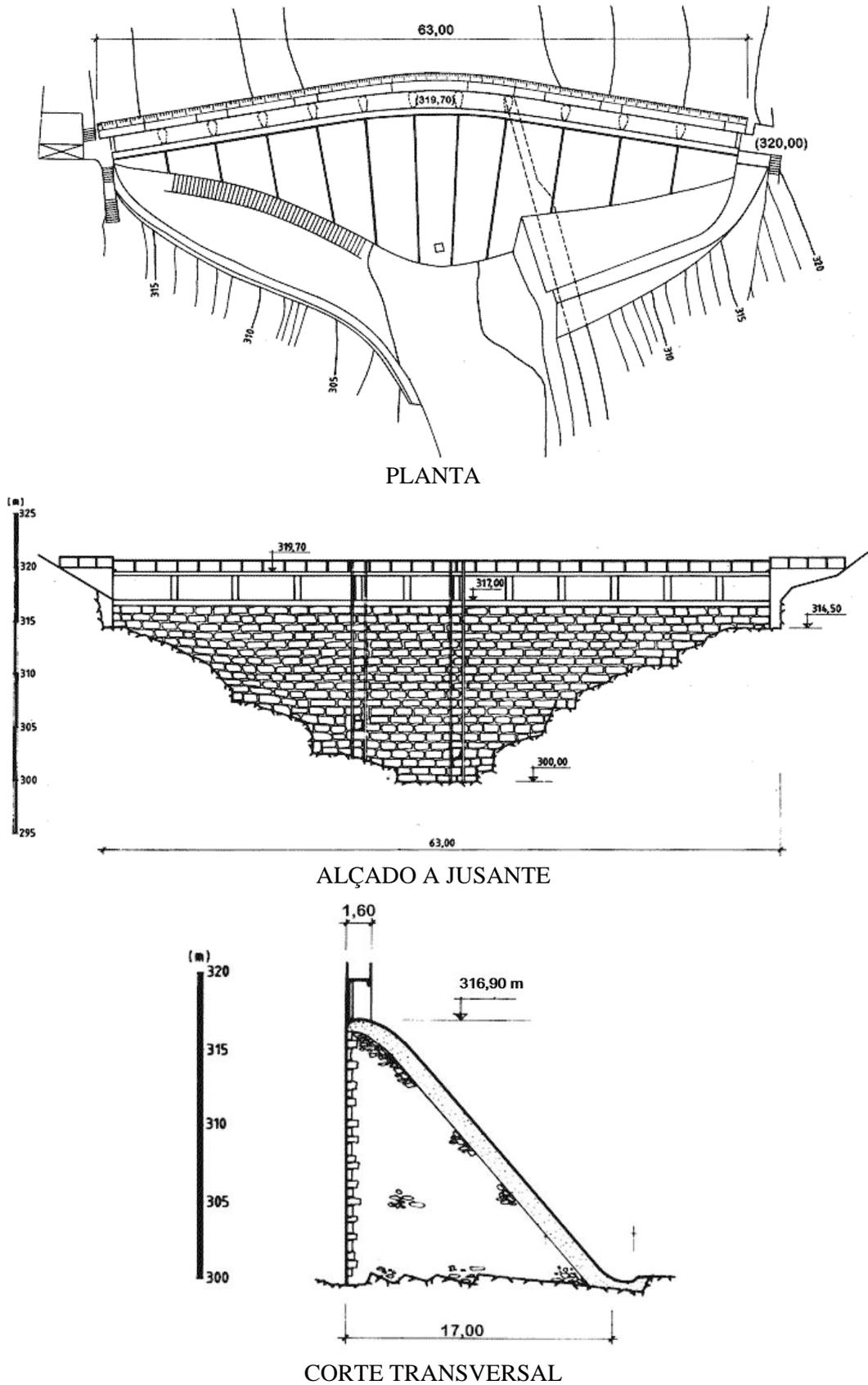


Figura 2.12 - Barragem de Freigil. Planta, alçado de montante e corte transversal

No Quadro 2.4 resumem-se as principais características da barragem de Freigil.

**Quadro 2.4 - Características da barragem de Freigil**

BARRAGEM	Localização	Distrito	Viseu
		Concelho	Cinfães
		Local	Fojo
		Bacia hidrográfica	Douro
		Linha de água	Rio Cabrum
	Utilização	Produção de energia	
	Tipo estrutural	Gravidade de alvenaria de granito	
	Altura acima da fundação	19,7 m (até ao piso do passadiço); 16,9 m (até à crista do descarregador)	
	Cota do coroamento	319,7 m	
	Fundação	Diorito	
	Volume de alvenaria	5000 m <sup>3</sup>	
	Projetista		
	Construtor		
	Ano de projeto	1926	
Ano de conclusão	1955		
ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA)	316,9 m	
	Nível de máxima cheia (NMC)	-	
	Área inundada no NPA	33 x 1000 m <sup>2</sup>	
	Capacidade total	140 x 1000 m <sup>3</sup>	
	Capacidade útil	138 x 1000 m <sup>3</sup>	
DESCARREGADOR DE CHEIAS	Localização	No corpo da barragem	
	Tipo de controlo	Sem controlo	
	Tipo de descarregador	Sobre a barragem	
	Cota da crista da soleira	317 m	
	Desenvolvimento da soleira	54,8 m	
	Dissipação de energia	Ressalto	
	Caudal máximo	400 m <sup>3</sup> /s	
DESCARGA DE FUNDO	Localização	Talvegue, através da barragem	
	Secção da conduta	0,8 x 0,8 m	
	Controlo a montante	Comporta plana	
	Controlo a jusante	-	
	Dissipação de energia	-	
	Caudal máximo	-	

### 2.3.5 Barragem do Covão do Ferro

A barragem do Covão do Ferro localiza-se na vertente sudeste da serra da Estrela, na ribeira de Alforfa (afluente do rio Zêzere), no concelho da Covilhã. A barragem situa-se junto à nascente da ribeira e a sua bacia hidrográfica corresponde a um covão de origem glacial com apenas 2 km<sup>2</sup> de superfície. É uma barragem gravidade, com altura máxima acima da fundação de 32,5 m a montante e de 35 m a jusante e cerca de 290 m de comprimento do coroamento. Tem planta poligonal, em que cada troço apresenta uma curvatura com a concavidade voltada para jusante (Figura 2.13). A portela da margem esquerda, onde se localiza o descarregador de superfície, é fechada com um dique retilíneo com cerca de 100 m de extensão. A barragem serve um conjunto de circuitos hidráulicos que terminam já perto de Unhais da Serra, formados por canais, câmaras de carga e condutas forçadas, que alimentam, sucessivamente, as centrais da Nave, Pedra Figueira, Alforfa e Estrela.



Figura 2.13 - Vista geral da barragem de Covão do Ferro

Foi construída entre 1935 e 1956, tendo como maciço de fundação granito de grão grosseiro, pouco alterado superficialmente. Um período tão prolongado de construção deveu-se à utilização, quase que exclusiva, de trabalho manual, e ainda ao facto de se ter laborado apenas nos períodos de junho a outubro, por razões climatéricas. Em 1941/42, durante a segunda guerra mundial, houve uma interrupção dos trabalhos por falta de cimento e combustível.

Os paramentos de montante e jusante são constituídos por alvenaria aparelhada, assente com argamassa, enquanto o interior é constituído por alvenaria irregular, ligada também por argamassa. Foram utilizadas argamassas de cal hidráulica nas primeiras fases e de cimento nas últimas fases. As selagens posteriores das juntas aparentes entre os blocos de pedra foram também realizadas, na sua maioria, com argamassas cimentícias. Nos primeiros 13,5 m do paramento de montante, medidos a partir do coroamento, o corpo da barragem é reforçado com uma parede de betão com cerca de 0,3 m de espessura. Entre 2004 e 2006 foi instalada, no paramento de montante, uma membrana de impermeabilização.

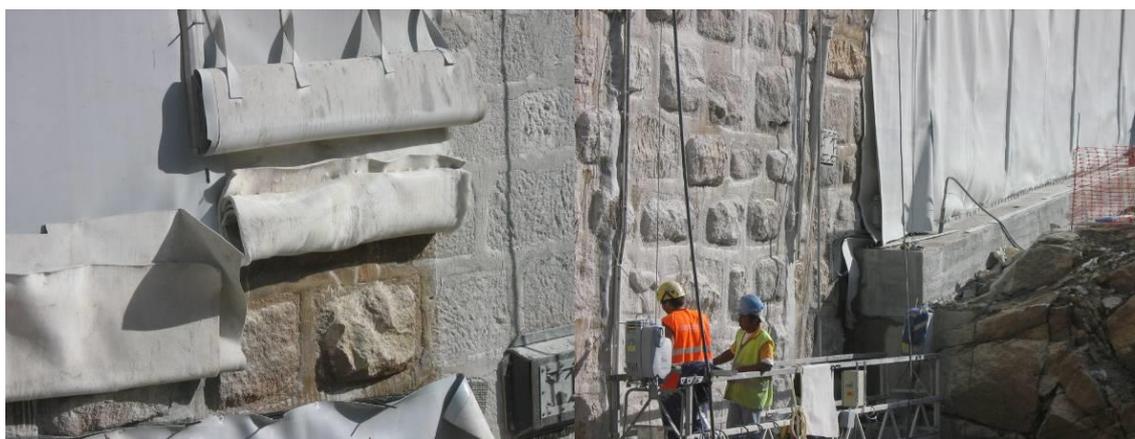
A barragem dispõe de uma galeria geral de drenagem (escavada na alvenaria, numa das reabilitações da obra) e de duas galerias longitudinais. Uma destas galerias, designada por galeria alta, desenvolve-se a cotas elevadas, a cerca de 5 m do paramento de montante. A outra galeria, referenciada como galeria baixa de jusante, desenvolve-se a cerca de 10 a 15 m do paramento de montante, funcionando como galeria de drenagem das alvenarias, do lado de jusante.

A descarga de fundo é obturada a montante por uma comporta metálica plana de 1,0 x 1,0 m<sup>2</sup> e controlada a jusante por uma válvula dispersora. Permite a vazão de um caudal máximo de 3,5 m<sup>3</sup>/s.



argamassas de ligação das alvenarias em consequência da infiltração de água proveniente da albufeira, mas também comportaram a consolidação parcial da fundação, a impermeabilização do maciço de fundação, a execução da cortina de drenagem da fundação e a remodelação dos órgãos hidráulicos.

A impermeabilização do paramento de montante foi realizada através da colocação de uma membrana de PVC, com densidade de 500 g/m<sup>2</sup>, sobre uma superfície estimada de 7.000 m<sup>2</sup>, mecanicamente fixada em perfis verticais ancorados na alvenaria e num plinto de betão executado ao longo do pé de montante da barragem (Figura 2.15). Em conjunto com a geomembrana aplicou-se um geotêxtil adicional, mais denso, com 2.000 g/m<sup>2</sup>, para aumentar à resistência ao punçamento, pois os paramentos de alvenaria, apesar de eliminadas as maiores saliências dos blocos de pedra, revelaram-se demasiadamente irregulares.



**Figura 2.15 – Barragem do Covão do Ferro. Aspectos dos trabalhos de colocação da membrana de impermeabilização no paramento de montante**

O tratamento do corpo da barragem foi realizado com recurso a injeções de calda de cimento, através de furos realizados a partir do coroamento, distanciados de cerca de 3 m, ao longo do corpo da barragem e da fundação. Foram injetadas cerca de 1.200 t de calda de cimento, num total de 2.500 m de furos.

Foram ainda realizadas as seguintes obras complementares: i) cortina de impermeabilização a montante, junto ao plinto, onde foram injetadas cerca de 200 t de calda de cimento, num total de 1.200 m de furos; ii) reforço do sistema de drenagem da fundação, através da abertura de novos drenos na galeria de drenagem; iii) execução de um conjunto de furos horizontais na zona inferior do corpo da barragem, para drenagem da membrana de impermeabilização; iv) reabilitação do sistema de observação existente, designadamente das bicas e do subsistema de observação geodésica; v) reforço do sistema de observação, através da instalação de um conjunto de piezómetros ao longo da galeria geral de drenagem e no paramento de jusante; vi) instalação de uma nova conduta na descarga de fundo; e vii) reparação da superfície do descarregador e sua proteção contra a erosão regressiva.

Após 2008 o dono de obra tem vindo a realizar, quando julgado necessário, durante as estiagens, com a albufeira vazia, trabalhos de beneficiação da obra e correção de pequenas anomalias, de que se destacam as reparações de rasgos que ocorreram na membrana de PVC, devido, essencialmente, ao impacto de materiais sólidos flutuantes. Na estiagem de 2012 foi concluída a montagem da nova conduta forçada e foi realizada a reparação dos seus berços de apoio. Na estiagem de 2013 foram realizados trabalhos de beneficiação na descarga de fundo e na tomada de água (tratamento dos betões nas zonas de entrada, tratamento anti-corrosivo da conduta da tomada de água e instalação de uma nova válvula de topo na conduta forçada) e reparações na membrana de impermeabilização (reparação de rasgos localizados e substituição das amarrações na envolvente dos emboquilhamentos dos órgãos hidráulicos) (LNEC, 2016d).

No Quadro 2.5 resumem-se as principais características da barragem do Covão do Ferro.

**Quadro 2.5 - Características da barragem de Covão do Ferro**

BARRAGEM	Localização	Distrito	Castelo Branco
		Concelho	Covilhã
		Local	Covão da Nave
		Bacia hidrográfica	Tejo
		Linha de água	Ribeira da Alforfa
	Utilização	Produção de energia	
	Tipo estrutural	Gravidade de alvenaria argamassada de granito	
	Altura acima da fundação	32,5 m (pé de montante); 35 m (pé de jusante)	
	Cota do coroamento	1579,24 m	
	Fundação	Maciço granítico	
	Volume de alvenaria	111 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
	Projetista	Sociedade Industrial Penteação e Fiação de Lãs (SIPFL)	
	Construtor	Sociedade Industrial Penteação e Fiação de Lãs (SIPFL)	
	Ano de conclusão	1956	
Última grande reabilitação	2004-2006		
ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA)	1577,09 m	
	Nível de máxima cheia (NMC) para T=1000 anos	1579,09 m	
	Área inundada no NPA	8,6 x 10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup>	
	Volume à cota do NPA	870 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
DESCARREGADOR DE CHEIAS	Localização	Dique da portela do lado esquerdo	
	Tipo de controlo	Livre	
	Tipo de descarregador	Sobre a encosta, com proteção de enrocamento arrumado	
	Cota da crista da soleira	1577,09 m	
	Desenvolvimento da soleira	5,20 m	
	Dissipação de energia	Ao longo da encosta	
	Caudal para NMC	17,7 m <sup>3</sup> /s	
DESCARGA DE FUNDO	Localização	Talvegue, através da barragem	
	Secção da conduta	Diâmetro de 600 mm	
	Controlo a montante	Comporta plana 1x1 m <sup>2</sup>	
	Controlo a jusante	Válvula de cunha	
	Dissipação de energia	Jato oco	
	Caudal máximo	3,5 m <sup>3</sup> /s	

## 2.4 Características das alvenarias de barragens

Não existe muita informação sobre as características mecânicas e hidráulicas das alvenarias das barragens, tanto em Portugal como no mundo. Os elementos bibliográficos que foi possível compilar sobre permeabilidade, deformabilidade e resistência de alvenarias de barragens dizem respeito, na sua maioria, a obras francesas. De facto, as barragens gravidade de alvenaria de pedra representam uma grande parte das obras construídas em França durante o século XIX e princípios do século XX. Até 1950 foram construídas em França cerca de setenta barragens de alvenaria, pelo que o estudo da sua deterioração, bem como a pesquisa de soluções para mitigar os seus efeitos, tem sido uma prioridade da engenharia francesa de barragens.

Os elementos mais relevantes sobre as características hidráulicas e mecânicas das barragens francesas, obtidas a partir de ensaios realizados sobre carotes extraídas do corpo das obras, foram recentemente compilados (Royet et al., 2013). No Quadro 2.6 apresentam-se esses elementos, designadamente o tipo de pedra usada nos blocos da alvenaria, o tipo de argamassa de ligação e valores das propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias (coeficiente de permeabilidade, índice de vazios, resistência à compressão, resistência à tração, coesão, ângulo de atrito interno, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson).

**Quadro 2.6 - Propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias das barragens francesas**  
(Royet et al., 2013)

Barragem (ano de construção)	Pedra	Argamassa	Propriedades hidráulicas e mecânicas
St-Ferreol (1672)	gnaisse	argamassa beije	$k = [1,3 ; 3,4] \times 10^{-6}$ m/s $d_s = 1,9$ $d_h = 2,1$
Lampy (1782)	granito cinzento	argamassa de cal	$k = [0,084 ; 1,2] \times 10^{-6}$ m/s $d_s = [1,69 ; 1,92]$ $d_h = 2,05$ $R_c = 5$ MPa $R_t = 0$ MPa pedra/argamassa 60/40%
Tillot (1834)	calcário sinemuriano	argamassa de cal hidráulica	$k = [3 \times 10^{-10} ; 9 \times 10^{-4}]$ m/s $d = 2,3$ $\phi' = [32 ; 41]^\circ$ $R_c \approx 5$ MPa
Chazilly (1837)	calcário sinemuriano	argamassa de cal hidráulica	$d_s = 2,05$ $d_h = 2,1$ $R_c = 5$ MPa $R_t = [0 ; 0,3]$ MPa pedra/argamassa 55/45 %
Grosbois (1838)	calcário	argamassa de cal hidráulica	$k = [1,2 \times 10^{-9} ; 8,6 \times 10^{-9}]$ m/s $d = 2,4$ $R_c \approx 5$ MPa $\phi' = [38 ; 44]^\circ$
Bosmeleac (1839)	xisto	argamassa de cal argilosa	$k = [10^{-6} ; 4,5 \times 10^{-4}]$ m/s
Settons (1858)	granito	argamassa de cal	$k = [5,8 \times 10^{-8} ; 3,5 \times 10^{-7}]$ m/s $d = 2,08$ $R_c = 6$ MPa $\phi = 36^\circ$ $E = 6500$ MPa $\nu = 0,42$ pedra/argamassa 53/47%
Gouffre d'Enfer (1866)	granito	argamassa de cal hidráulica e de areia granítica	$k = [0,3 \text{ a } 3] \times 10^{-7}$ m/s $d = 2,24$ $R_c = [4 ; 14]$ MPa pedra/argamassa 60/40%

**Quadro 2.6 (continuação) - Propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias das barragens francesas (Royet et al., 2013)**

Barragem (ano de construção)	Pedra	Argamassa	Propriedades hidráulicas e mecânicas
Ternay (1867)	granito	?	$d= 2,35$ $R_c > 10 \text{ MPa}$ $E= 14000 \text{ MPa}$ $\nu= 0,15$ pedra/argamassa 60/40 %
Pas de Riot (1878)	granito	argamassa de cal	$k= [1,6 \times 10^{-7} ; 3 \times 10^{-6}] \text{ m/s}$ $d_h= 2,3 ; \nu= 0,2$ $R_t= [0,3 ; 0,6] \text{ MPa}$ $E= 7130 \text{ MPa} ; E_{def}= 3530 \text{ MPa}$
La Bourne (1878)	?	argamassa de cal	alvenaria com agregado grosso
Pont et Massene (1882)	granulito	argamassa de cal hidráulica e de cimento	$k= [2 \times 10^{-7} ; 3 \times 10^{-6}] \text{ m/s}$ $d_h= 2,28$ $R_c \approx 3,4 \text{ MPa} ; R_t= [0 ; 0,5] \text{ MPa}$ $\phi' = [30 ; 40]^\circ$ pedra/argamassa 65/35 %
Alfed (1887)	granito	argamassa de cal, cimento e areia	?
Chartrain (1891)	granito	argamassa de cal	$d_s= 2,27$ $R_c > 15 \text{ MPa} ; R_t > 1,2 \text{ MPa}$ $\phi' = 45^\circ$ $c= 0,4 \text{ MPa}$ pedra/argamassa 55/45 %
Altenweiher (1893)	granito	argamassa de cal, cimento e areia	?
Echape (1898)	granito	argamassa de cal hidráulica	$k= [10^{-6} ; 10^{-5}] \text{ m/s}$ $E= 6000 \text{ MPa}$ pedra/argamassa 55/45 %
Redevis (1909)	granito	argamassa de cal hidráulica e areia	argamassa < 50 %
Buillouse (1904/1910)	granito	argamassa de cal hidráulica	pedra/argamassa 70/30 %
Dardennes (1912)	calcário	argamassa de cal hidráulica e cimento	$v_p= [3000 ; 4500] \text{ m/s}$ $v_s= [1500 ; 2500] \text{ m/s}$ $d_s= [2 ; 2,7] ; d_h= [2 ; 2,5]$ $R_t= [1,7 ; 4] \text{ MPa} ; R_c \approx 16 \text{ MPa}$ $E \approx 18000 \text{ MPa}$
Les Mesce (1917)	?	argamassa de cal hidráulica e cimento	$d= 2,2$ $E_{din} \approx 12000 \text{ MPa}$ $\nu= 0,3$
Lac d'Oo (...)	granito	argamassa grosseira	$d= 2,2$
Montaigut (1920)	granito	argamassa de cal hidráulica	$d_s= 2,2 ; d_h= 2,35$
St Martin de Londres (1923)	calcário	argamassa de cal hidráulica	$v_{son}= [2000 ; 2800] \text{ m/s}$

**Quadro 2.6 (continuação) - Propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias das barragens francesas (Royet et al., 2013)**

Barragem (ano de construção)	Pedra	Argamassa	Propriedades hidráulicas e mecânicas
La Gimont (1925)	granito	argamassa de cal e de areia granítica	$d = 2,2$ $R_c = 9 \text{ MPa}$ $G_{din} = [6000 ; 12400] \text{ MPa}$ $E_{din} = [15900 ; 31300] \text{ MPa}$ $\nu = [26 ; 35]$
Charpal (1932)	feldspato	argamassa de cal e de areia granítica	$k = [10^{-6} ; 10^{-5}] \text{ m/s}$ $\nu_{son} = [3780 ; 4000] \text{ m/s}$ $d \approx 2,25$ $R_c = [13 ; 33] \text{ MPa}$ $\phi'_{(pic)} = 46^\circ$ $\phi'_{residual} = 38,5^\circ$ $c' = 0,25 \text{ MPa}$ $c = 0$
Izourt (1940)	micaxisto	argamassa de cimento portland	detetados defeitos de enchimento
Oule (1924/1950)	xisto e granito	argamassa de cimento	$n \approx 15\%$ $d = 2,4$ $R_c \approx 14,2 \text{ MPa}$ $R_t \approx 3,7 \text{ MPa}$ pedra/argamassa 70/30 %
Motz	calcário	argamassa de cimento	Índice de permeabilidade $< 20 \text{ UL}$ $\nu_{son} \approx [2000 ; 6000] \text{ m/s}$ $d \approx 2,23$ Índice de vazios de 10 a 20%
Balme Rencurel	calcário	argamassa de cimento	$k = [1 ; 5] 10^{-5} \text{ m/s}$ $\nu_{son} = [3300 ; 3900] \text{ m/s}$ $E_{din} = [15 ; 25] \text{ GPa}$

Relativamente às barragens portuguesas de alvenaria, apenas existe alguma informação sobre a permeabilidade da barragem da Póvoa. Esta barragem localiza-se no distrito de Portalegre, concelho de Nisa e insere-se no aproveitamento hidroelétrico da ribeira de Nisa. É um dos mais antigos aproveitamentos hidroelétricos portugueses, estando há mais de 75 anos em exploração. É constituído por uma barragem de alvenaria, uma central hidroelétrica implantada no leito da ribeira de Nisa, cerca de 140 m a jusante da barragem, uma descarga de fundo e dois descarregadores de cheias. A construção da barragem decorreu, de forma faseada, durante a década de 1920, tendo a sua exploração sido iniciada em 1927, quando a barragem tinha uma altura de 22 m, atingindo, no final da sua construção, 28,5 m. Conforme é habitual nestas estruturas, a barragem foi construída sobrepondo camadas sucessivas de blocos de rocha de formas e dimensões irregulares, ligados por argamassa. Os paramentos foram realizados com pedras de forma e dimensões regulares. Junto à fundação e ao paramento de montante, foi utilizada argamassa de cimento e areia, mas nas restantes partes da obra foi usada cal hidráulica como ligante. No que respeita à monitorização de deslocamentos, o atual plano de observação da obra apenas contempla a medição de deslocamentos verticais do coroamento. Devido a um conjunto de anomalias da obra, entre as quais a existência de passagens de água pelo paramento de jusante, no interior das galerias e junto ao pé de jusante, foram estudadas soluções de reabilitação da obra. No âmbito desses estudos foi determinada, em ensaios realizados “in situ” do tipo Lefranc, um coeficiente de permeabilidade com valores compreendidos entre  $10^{-6}$  e  $10^{-5}$  m/s. De uma forma geral, o trecho situado mais próximo do coroamento apresentou valores mais elevados de permeabilidade, sendo a parte mais profunda menos permeável (Miranda, 2005).

## **3. Metodologias de análise da percolação e de análise estrutural de barragens de alvenaria**

### **3.1 Percolação em corpos permeáveis**

#### **3.1.1 Aproximações de meios contínuos e descontínuos**

Os escoamentos através do corpo e da fundação de barragens são, na maior parte dos casos, de natureza tridimensional. No caso de barragens de betão e de alvenaria, podem ocorrer através de descontinuidades (juntas e/ou fendas do corpo das obras e falhas e/ou fraturas nos maciços rochosos de fundação) e/ou através dos meios contínuos permeáveis. A percolação predominante acontece através das descontinuidades, mas como é difícil, em geral, fazer a caracterização do escoamento através de meios descontínuos, assume-se, quando as descontinuidades não são muito afastadas, que pode ser simulado através da consideração de um meio contínuo equivalente, sendo mais fácil de caracterizar.

Os modelos tridimensionais envolvem, na sua definição e análise, um grande volume de informação, tanto na geração de dados (discretização do domínio e definição das propriedades dos materiais e das condições de fronteira) como no próprio processo de cálculo e na interpretação de resultados (Mascarenhas, 1979). Esta complexidade é acrescida quando se utilizam modelos descontínuos, onde o escoamento se dá através das descontinuidades e fraturas do meio.

Atendendo a este conjunto de dificuldades apontadas, os modelos tridimensionais, em geral, e os modelos descontínuos, em particular, são pouco utilizados na prática, sendo corrente, no estudo de escoamentos em barragens e nos seus maciços rochosos de fundação, fazerem-se algumas aproximações para poderem ser usados modelos planos contínuos.

As barragens de alvenaria de pedra são constituídas, em regra, como referido, por paramentos de blocos de alvenaria aparelhada, ligados por argamassa, e núcleo de alvenaria irregular, com blocos a granel, também ligados por argamassa. Face a estas circunstâncias, a percolação de água através do seu corpo dar-se-á através de: i) juntas estruturais, caso existam; ii) eventuais fendas nos blocos e nas argamassas; iii) irregularidades e defeitos nos blocos e nas argamassas; e iv) argamassas desagregadas e/ou deterioradas. Face à dimensão dos blocos de alvenaria quando comparada com as dimensões das obras, afigura-se como razoável a consideração de um modelo contínuo para o estudo do escoamento através do corpo destas obras. Assim, nos estudos deverá ser considerada a permeabilidade média do meio, assumindo-se como um meio contínuo equivalente.

Uma vez que não existem dados sobre a permeabilidade das barragens consideradas como casos de estudo, será considerado, para cada uma delas, um valor médio global do coeficiente de permeabilidade. Este coeficiente será considerado como um elemento classificativo do estado de conservação das respetivas alvenarias.

### 3.1.2 Conceitos de porosidade e permeabilidade

A porosidade e a permeabilidade são propriedades macroscópicas que traduzem, respetivamente, a medida do volume de vazios (e, portanto, o volume de água contido) e a maior ou menor capacidade de circulação da água através dos vazios.

A porosidade define-se como a relação entre o volume de vazios e o volume total de uma dada amostra do meio, exprimindo-se usualmente em percentagem. A porosidade efetiva de um material é a relação entre o volume de vazios que comunicam entre si e o volume total de uma dada amostra do meio, e a porosidade drenável é a relação entre o volume de água drenado por gravidade a partir de uma amostra inicialmente saturada e o volume total desta (Mascarenhas, 1979).

### 3.1.3 Equações governativas do escoamento

A permeabilidade, também designada por permeabilidade intrínseca, é definida com base na lei de Darcy e representa o volume de um fluido de viscosidade dinâmica unitária que passa através de uma secção do meio de área unitária, por unidade de tempo e sob ação de um gradiente unitário de pressão (Muskat, 1946). Henry Darcy, em “*Les Fontaines Publiques de la Ville Dijon*”, de 1856, comprovou que o volume de água que na unidade de tempo flui através de uma secção  $A$  é proporcional ao gradiente hidráulico  $i$ ,

$$i = \frac{\Delta H}{l} \quad (3.1)$$

onde  $\Delta H$  é a queda de pressão (em altura equivalente de água) e  $l$  o comprimento percorrido na unidade de tempo.

A lei de Darcy, que define a velocidade constante do fluxo que atravessa um meio homogéneo e uniforme, é dada por,

$$v = k * i \quad (3.2)$$

sendo  $k$  um fator de proporcionalidade entre a velocidade de percolação da água no meio e o gradiente da carga hidráulica  $i$ , designado por coeficiente de permeabilidade, que depende essencialmente da natureza do meio percorrido pela água. Esta lei aplica-se apenas para o regime laminar de escoamento através do meio (Andrade, 1983).

A permeabilidade depende apenas das propriedades do meio, isto é, da natureza, forma, dimensões e grau de interligação dos interstícios (Mascarenhas, 1979). É suscetível de variar no tempo devido a numerosas causas, tais como solicitações exteriores, colmatagem, fenómenos erosivos ou físico-químicos, entre os quais os de dissolução de materiais, como é o caso da lixiviação dos materiais cimentícios das argamassas das barragens de alvenaria, após a dissolução dos carbonatos dos ligantes. Uma das consequências da lixiviação das argamassas de ligação é o aumento da permeabilidade das alvenarias e o conseqüente incremento da sua deterioração.

## 3.2 Análise estrutural de corpos deformáveis

Considere-se um domínio formado por um volume e limitado por uma fronteira, com geometria definida no referencial cartesiano ortonormal  $x_i$  ( $i = 1,2,3$ ).

Na hipótese dos pequenos deslocamentos, as seis componentes do tensor das deformações relacionam-se com os deslocamentos  $u_i$  ( $i = 1,2,3$ ) através da relação,

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (i, j = 1,2,3) \quad (3.3)$$

O equilíbrio de forças num elemento de volume, considerando as seis componentes do tensor das tensões  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1,2,3$ ) e as forças mássicas por unidade de volume  $b_i$  ( $i = 1,2,3$ ), conduz a

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + b_j = 0, \quad (i, j = 1,2,3) \quad (3.4)$$

Nos pontos de fronteira do domínio, caracterizados pela normal  $n_i$  ( $i = 1,2,3$ ) e onde atuam forças distribuídas por unidade de superfície  $q_i$  ( $i = 1,2,3$ ), as equações de equilíbrio tomam a forma,

$$\sigma_{ij} n_i = q_j, \quad (i, j = 1,2,3) \quad (3.5)$$

Admitindo que o comportamento dos materiais é elástico linear e independente do tempo, as tensões e as deformações relacionam-se por

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} * \varepsilon_{kl}, \quad (i, j, k, l = 1,2,3) \quad (3.6)$$

sendo  $D_{ijkl}$  a matriz de elasticidade. Para meios homogéneos e isotrópicos esta matriz depende apenas do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material.

Considerando as equações gerais da teoria da elasticidade ((3.3) a (3.6)), é possível obter os campos de deslocamentos, deformações e tensões em qualquer estrutura sujeita a forças de massa e forças distribuídas, desde que se considerem as condições de fronteira da estrutura, que podem ser de dois tipos: i) imposição, em pontos de fronteira, de algumas componentes de deslocamentos (apoios rígidos); ii) imposição das relações forças-deslocamentos que se verificam na fronteira (apoios elásticos).

Apenas existem soluções analíticas das equações da teoria da elasticidade para casos muito particulares. Em regra, elas são resolvidas através de métodos numéricos, obtendo-se soluções aproximadas. O método numérico mais utilizado na resolução de problemas estruturais é o método dos elementos finitos, que envolve a discretização do domínio em partes e o cálculo de uma matriz de rigidez, que relaciona as forças aplicadas nos pontos nodais de discretização com os respetivos deslocamentos. Trata-se assim de um método implícito de resolução.

Existem outros tipos de métodos de resolução das equações da teoria da elasticidade, designados por métodos explícitos. Nestes métodos a solução é obtida resolvendo de forma iterativa as equações referidas para uma dada discretização do domínio, destacando-se entre eles os métodos das diferenças finitas e dos elementos discretos (Oliveira, 1999).

### 3.3 Programa de cálculo automático utilizado

#### 3.3.1 Características do programa de cálculo escolhido

Como referido, os modelos de percolação e estruturais foram resolvidos através do programa comercial *FLAC* (“Fast Lagrangian Analysis of Continua”), que é um código computacional explícito, bidimensional, que tem como base o método das diferenças finitas. O código foi desenvolvido com o objetivo de resolver problemas geotécnicos, pelo que permite a análise da percolação e a análise estrutural (considerando comportamentos lineares e não-lineares). Os materiais são discretizados em zonas (elementos), formando uma malha, à qual se impõem condições de fronteira. Para cada zona são definidas as propriedades dos materiais.

O esquema de cálculo do *FLAC*, iterativo, não requer muita memória computacional, uma vez que não são formadas matrizes. No presente trabalho foram utilizadas as seguintes possibilidades do programa:

- Geração automática de malhas regulares;
- Zonamento em estado plano de deformação e de tensão;

- Análise de escoamento;
- Análise estrutural estática;
- Efeitos de variações de temperatura;
- Tratamento gráfico de resultados para diversas combinações de efeitos.

O programa permite ainda considerar: estados axissiméricos; zonas de interface na malha, de modo a simular descontinuidades; elementos estruturais de suporte (exemplo: túneis, elementos de fundação); modelos viscoelásticos ou viscoplásticos; presença de água e efeito de consolidação; presença de dois fluidos diferentes (exemplo: água e gás); e análise dinâmica.

O FLAC contém uma linguagem interna de programação, *FISH* (abreviatura para *FLACish*), que permite criar rotinas auxiliares para facilitar a sua utilização e implementar modelos constitutivos (FLAC, 2011). No presente estudo foi utilizada a versão 7.0 do programa.

### 3.3.2 Método de diferenças finitas

A solução de uma equação de derivadas parciais (EDPs) numa região R implica a obtenção dos valores para a variável dependente em cada ponto de R. Apenas se pode considerar uma solução contínua se existir uma fórmula analítica para a solução do problema. Com o uso dessa fórmula, pode-se calcular a solução em qualquer ponto da região. No entanto, a maior parte das equações não têm soluções analíticas, por isso é necessário usar métodos numéricos para as resolver. Com estas técnicas numéricas não é possível tratar a região como contínua, obtendo-se a solução em pontos discretos (x,y). Escolhem-se então, previamente, alguns pontos na região R e calcula-se neles a solução do problema. A este processo dá-se o nome de discretização, e ao conjunto de pontos discretos dá-se o nome de malha (Figura 3.1).

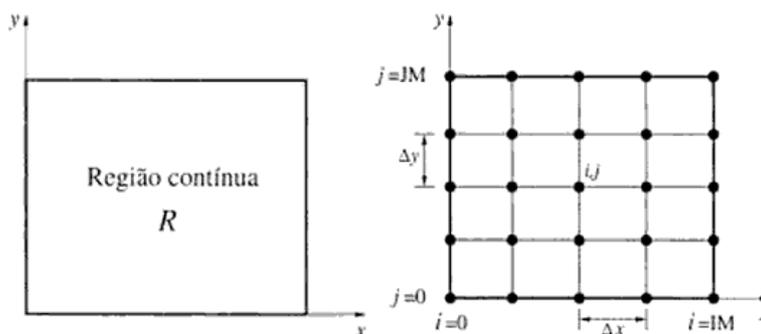


Figura 3.1 - Discretização de uma região R contínua (Fortuna, 2000)

Os pontos da malha localizam-se na interseção de linhas horizontais e verticais, estando separados entre si por uma distância  $\Delta x$  na direção horizontal e  $\Delta y$  na direção vertical. Os índices (i,j) identificam os pontos na i-ésima coluna e j-ésima linha, respetivamente. Assim, para a malha em apreço, o ponto (i,j) tem coordenadas  $(x_0 + i\Delta x, y_0 + j\Delta y)$ , em que  $(x_0, y_0)$  representa a origem do sistema de coordenadas, que no caso da Figura 3.1 é (0,0). Os valores de  $\Delta x$  e  $\Delta y$  não necessitam de ser iguais e constantes, podendo variar de ponto para ponto.

Para que seja possível tratar numericamente as EDPs, estas devem ser expressas na forma de operações aritméticas que o computador possa executar. Para isso, deve-se proceder à substituição das equações diferenciais por equações algébricas. Estas expressões podem ser manipuladas pelo computador, relacionando entre si os valores das grandezas nos pontos discretos ( $i\Delta x, j\Delta y$ ) da região R. Portanto, antes de se resolver a EDPs de forma numérica, é preciso encontrar, para os termos que nela aparecem, as respetivas expressões escritas em função dos pontos da malha. Estas expressões são denominadas de *aproximações por diferenças finitas*. O resultado final desse processo é uma equação algébrica, denominada *equação de diferenças finitas* (EDF). A EDF é escrita para cada ponto da região discretizada em que se deseja calcular a solução do problema. Resolvendo as EDF, encontra-se a solução aproximada do problema, sendo previamente definido

o grau de aproximação pretendido. Haverá, contudo, erros residuais, devidos ao processo de discretização das equações, a arredondamentos nos cálculos feitos no computador e na aproximação numérica das condições de fronteira.

A derivada de uma função  $f$  contínua corresponde ao cálculo do limite,

$$\frac{df}{dx} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (3.7)$$

Considerando incrementos da função  $f$  e de  $x$  ( $h$  deixa de tender para zero), a expressão 3.7 passa a representar uma aproximação algébrica para a primeira derivada da função  $f$ ,

$$\frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (3.8)$$

As aproximações de diferenças finitas podem ser obtidas de várias formas. As mais comuns são a expansão em série de Taylor (que se exporá de seguida) e a interpolação polinomial.

Para a expansão em série de Taylor, suponha-se que  $f$  é uma função contínua no intervalo  $[a, b]$  e que tem derivadas contínuas nesse intervalo até à ordem  $N$ . O teorema de Taylor permite escrever, para qualquer ponto  $x \in [a, b]$ ,

$$f(x) = f(x_0) + (\Delta x) \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x_0} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_{x_0} + \dots + R_N \quad (3.9)$$

em que  $\Delta x = x - x_0$  e  $R_N$  é o resto, definido como,

$$R_N = \frac{(\Delta x)^N}{N!} \left. \frac{d^N f}{dx^N} \right|_{\zeta}, \quad \zeta \in [a, b] \quad (3.10)$$

Considere-se a Figura 3.2, que mostra alguns pontos de uma malha unidimensional, uniformemente espaçados,  $x_i - x_{i-1} = \Delta x$ .

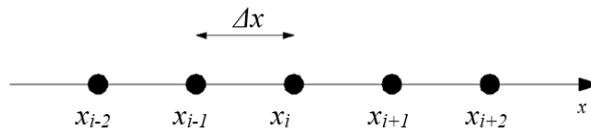


Figura 3.2 - Malha de pontos uniformemente espaçados

Para determinar a primeira derivada de uma função  $f$  no ponto  $x_i = i\Delta x$ , tem-se,

$$f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + (\Delta x) \left. \frac{df}{dx} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_i + \dots + R_N \quad (3.11)$$

Para garantir a existência das expansões em série de Taylor,  $N$  será considerado sempre maior que a maior ordem das derivadas que aparecem nessas expansões. Assim, será  $N > 3$  na expressão (3.11). Isolando a primeira derivada, pode escrever-se,

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} + \left[ -\frac{(\Delta x)}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i - \frac{(\Delta x)^2}{3!} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_i - \dots - R_N \right] \quad (3.12)$$

A primeira derivada é então dada pelo quociente,

$$\frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} \quad (3.13)$$

mais os termos da série de Taylor até  $R_N$ , a que se dá o nome de *erro local de truncamento* (ELT).

$$ELT = \left[ -\frac{(\Delta x)}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_i - \frac{(\Delta x)^2}{3!} \frac{d^3 f}{dx^3} \Big|_i - \dots - R_N \right] \quad (3.14)$$

Este erro aparece devido à utilização de um número finito de termos na série de Taylor. O ELT é a medida entre o valor exato da derivada e a sua aproximação numérica, sendo fácil perceber que para  $0 < \Delta x < 1$  essa diferença diminui com a redução do espaçamento  $\Delta x$ , isto é, com o refinamento da malha. Assim, os termos do ELT podem ser representados por  $O(\Delta x)$ , indicando como o erro local de truncamento varia com o refinamento da malha.

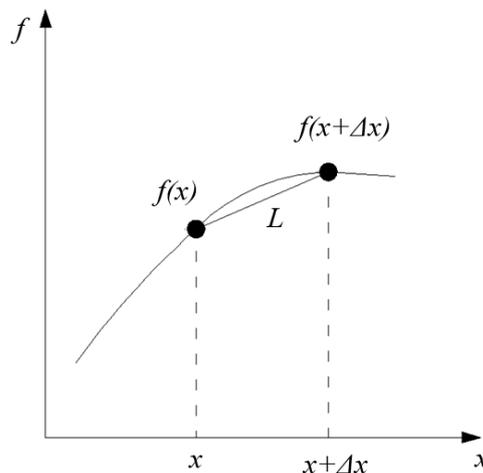
Por forma a simplificar as notações, pode-se representar  $f(x_i \pm k\Delta x)$  por  $f_{i\pm k}$ , e portanto,

$$\frac{df}{dx} \Big|_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.15)$$

A expressão (3.15) é a equação de diferenças finitas que representa uma aproximação de primeira ordem para a primeira derivada de  $f$ , utilizando diferenças progressivas. De facto,

- É de primeira ordem porque no termo dominante do ELT,  $\Delta x$  aparece elevado à primeira potência;
- É de diferenças progressivas porque no cálculo da derivada do ponto  $x_i$ , foi utilizado um ponto adiante deste,  $x_{i+1}$ .

Conforme mostra a Figura 3.3, a inclinação (primeira derivada) de  $f$  em  $x_i$  é aproximada pela inclinação da reta  $L$ .



**Figura 3.3 - Pontos utilizados na expressão (3.15) para o cálculo da primeira derivada de  $f$  por diferenças progressivas**

Pela Figura 3.3 percebe-se, tal como referido aquando da análise do ELT, que quanto menor for o espaçamento  $\Delta x$ , menor será o erro. De forma análoga pode-se utilizar a aproximação por *diferenças atrasadas*,

$$\frac{df}{dx} \Big|_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.16)$$

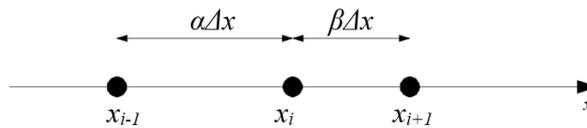
ou conjugando as duas, de modo a criar uma aproximação de segunda ordem eliminando a segunda derivada de  $f$ ,

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (3.17)$$

a que se dá o nome de aproximação por *diferenças centrais*. Utilizando o mesmo raciocínio da análise do erro em função do espaçamento  $\Delta x$ , verifica-se que a redução deste espaçamento provoca uma diminuição quadrática do ELT da aproximação da primeira derivada de  $f$ , uma vez que ao dividir-se o espaçamento por dois (por exemplo) o erro será dividido por quatro, sem se precisar de quatro vezes mais pontos. Este método revela-se muito útil, já que com menor número de pontos, e portanto com menor esforço computacional, consegue-se uma aproximação melhor que aquelas que são fornecidas pelas aproximações de primeira ordem. No entanto, quando o valor de  $\Delta x$  se torna muito pequeno, os erros de arredondamento nos cálculos começam a dominar o ELT das expressões de diferenças finitas, e o erro relativo percentual aumenta.

A solução numérica de uma EDPs pode apresentar regiões nas quais os gradientes da solução são elevados, e outras em que os gradientes são pequenos. A solução passa por utilizar-se nas regiões em que os gradientes são elevados uma malha fina, isto é, com um espaçamento pequeno entre pontos, e nas regiões em que os gradientes são pequenos, uma malha grossa.

Considerem-se agora pontos com espaçamento não uniforme (Figura 3.4).



**Figura 3.4 - Pontos com espaçamento não-uniforme**

Expandindo  $f(x_i - \alpha\Delta x)$  e  $f(x_i + \beta\Delta x)$  em torno do ponto  $x_i$ , tem-se,

$$f(x_i - \alpha\Delta x) = f(x_i) - (\alpha\Delta x) \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i + \frac{(\alpha\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + O(\Delta x)^3 \quad (3.18)$$

$$f(x_i + \beta\Delta x) = f(x_i) + (\beta\Delta x) \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i + \frac{(\beta\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + O(\Delta x)^3 \quad (3.19)$$

Combinando as duas expressões,

$$\begin{aligned} & \alpha \cdot f(x_i + \beta\Delta x) - \beta \cdot f(x_i - \alpha\Delta x) = \\ & = (\alpha - \beta)f(x_i) + 2\alpha\beta(\Delta x) \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i + (\alpha\beta^2 - \alpha^2\beta) \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + O(\Delta x)^3 \end{aligned} \quad (3.20)$$

e isolando a primeira derivada, obtém-se,

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i = \frac{\alpha f_{i+1} - \beta f_{i-1} + (\beta - \alpha)f_i}{2\alpha\beta\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.21)$$

Todas estas expressões podem ser aplicadas a funções de mais do que uma variável. Supondo que  $f = f(x, y)$ , uma aproximação de  $O(\Delta x)^2$  para  $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{i,j}$  é dada por,

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (3.22)$$

em que o índice  $j$  está associado à coordenada  $y$ , ou seja  $y_i = j\Delta y$  (Fortuna, 2000). Com as expansões em série de Taylor de  $f(x,y)$  em torno do ponto  $(x_i, y_j)$  podem também determinar-se expressões envolvendo derivadas mistas, isto é,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right) \quad (3.23)$$

No programa FLAC estas expressões, obtidas pelo método das diferenças finitas, são utilizadas na aproximação numérica das equações teóricas, quer nas dimensões espaciais, quer no domínio do tempo. No domínio espacial, a aproximação por diferenças finitas permite o cálculo numérico das componentes do tensor das deformações nas zonas (eq. 3.3). No domínio do tempo, o programa utiliza um algoritmo de solução explícito, em que a evolução dos deslocamentos dos pontos nodais é obtida com base na aproximação de diferenças centrais. Deve referir-se que este algoritmo explícito é também utilizado na obtenção de soluções estáticas, constituindo neste caso um método iterativo em que a escala de tempos é fictícia.

### 3.3.3 Exemplo de teste

Para testar o programa de cálculo automático selecionado, em aplicações do tipo das pretendidas, foi construído um modelo simplificado para representar um perfil de uma barragem gravidade de alvenaria de pedra. A malha mais pequena que pode ser analisada com o programa é com uma zona. No entanto, para uma maior precisão dos resultados obtidos, é comum serem criadas centenas ou milhares de zonas quadrangulares, limitadas e definidas pelos pontos dos seus vértices em coordenadas “ $i$ ” com direção horizontal, e coordenadas “ $j$ ” com direção vertical. A malha é assim organizada em linhas e colunas com as coordenadas  $i$  crescentes da esquerda para a direita e as coordenadas  $j$  crescentes de baixo para cima. Tratando-se de zonas quadrangulares, todas elas são definidas por um par de coordenadas  $(i,j)$ .

Considerou-se uma barragem gravidade com perfil aproximadamente triangular, apoiada numa fundação com deslocamentos laterais impedidos. A barragem tem 50 m de altura e 40 m de apoio na base. Admitiu-se que os materiais são homogéneos e isotrópicos.

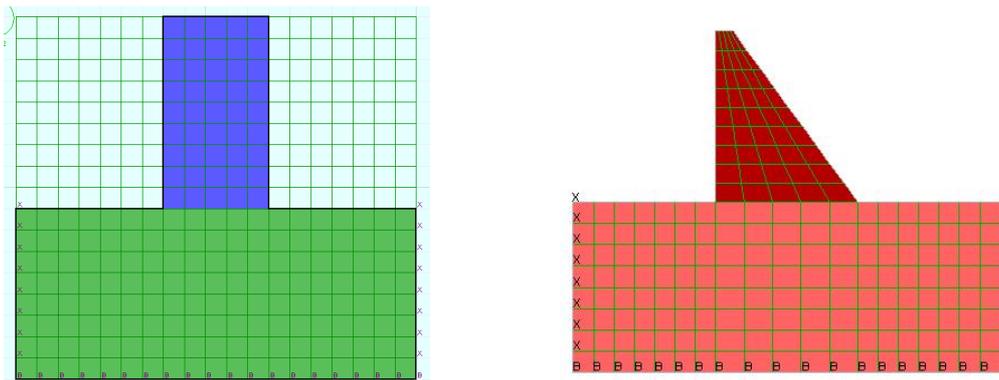


Figura 3.5 - Representação do modelo da barragem e da fundação do exemplo de teste, com os diferentes elementos da malha de cálculo: em coordenadas isoparamétricas (à esquerda) e em coordenadas cartesianas (à direita).

Considerou-se o NPA à cota de coroamento da barragem e que a jusante não existia água. O coeficiente de permeabilidade adotado para o corpo da barragem foi de  $1 \times 10^{-5}$  m/s, tendo-se considerado a fundação impermeável. As pressões no paramento de montante foram definidas



para cima (Figura 3.8). Adotando a formulação apresentada no início do capítulo 6, consideraram-se as deformações impostas (através de temperaturas equivalentes) correspondentes a uma perda de massa de 0,001% da barragem em 10 anos, causada pela lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias (que se admite serem proporcionais ao caudal que passa em cada ponto do modelo) e determinaram-se os deslocamentos induzidos por esta ação, estimando-se um deslocamento horizontal para montante de 0,3 mm e um assentamento de 0,4 mm (Figura 3.9).

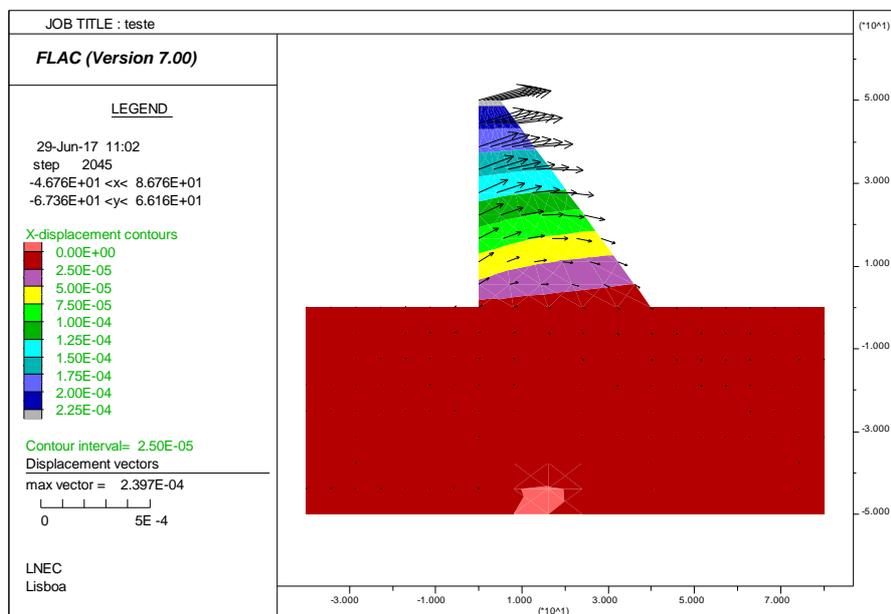


Figura 3.8 – Exemplo de teste. Representação dos deslocamentos devidos à pressão hidrostática

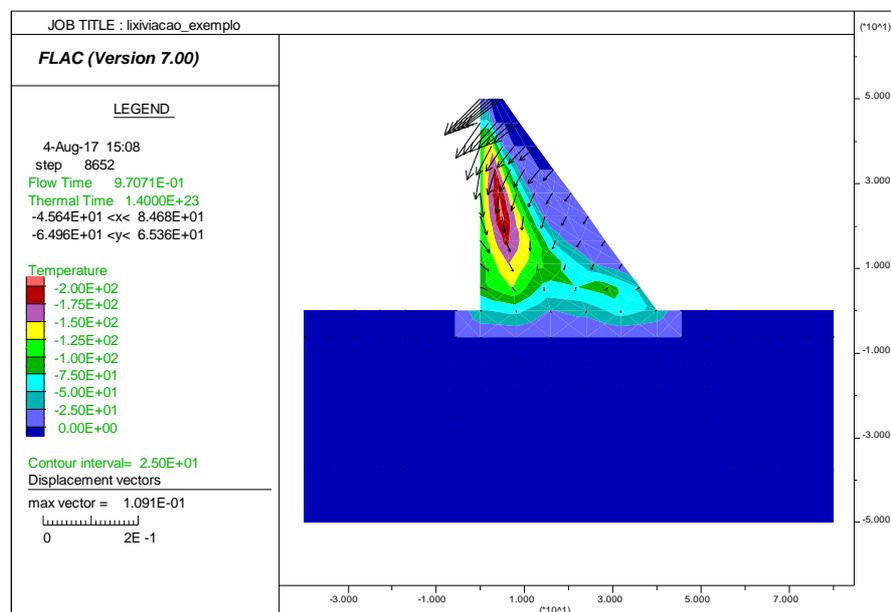


Figura 3.9 – Exemplo de teste. Representação das temperaturas equivalentes à perda de massa por lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias (cores) e dos correspondentes deslocamentos (vetores).

## **4. Análise da percolação através do corpo das barragens de alvenaria**

### **4.1 Considerações gerais**

Para realizar a análise da percolação através do corpo das barragens de alvenaria foram elaborados modelos bidimensionais, para representar as malhas de diferenças finitas, dos perfis transversais das quatro obras em estudo. Para facilitar a construção das malhas, dado serem qualitativamente semelhantes, foi desenvolvido um algoritmo de cálculo dedicado. Os modelos foram construídos considerando uma base de apoio, correspondente ao maciço rochoso de fundação, com uma altura de aproximadamente 1,5 vezes a altura da barragem e um comprimento cerca de 3 vezes maior que a base da barragem. Foram consideradas malhas quadrangulares, definindo quatro pontos de amostragem nos seus vértices.

Consideraram-se zonas distintas de permeabilidade e de deformabilidade nas discretizações correspondentes ao maciço de fundação, às alvenarias do corpo das obras e aos trechos específicos de betão. As galerias existentes no corpo das barragens tiveram representação explícita nas malhas de cálculo, dada a sua importância no controlo do escoamento.

Nas análises da percolação através do corpo das obras considerou-se apenas a permeabilidade das alvenarias relativamente à infiltração de água através do paramento de montante. A fundação foi considerada impermeável, pois não tinha interesse, para os objetivos do estudo, quantificar os efeitos da água drenada da fundação. Uma vez que a permeabilidade do betão é incomparavelmente mais pequena que a das alvenarias, foram também consideradas como impermeáveis os trechos de betão das obras. Admitiu-se ainda a hipótese de que os meios permeáveis eram indeformáveis, sendo o escoamento independente do estado de tensão instalado nas estruturas.

Considerando os resultados da observação contínua das obras, no que respeita aos caudais infiltrados pelo corpo das obras, efetuou-se uma estimativa da permeabilidade média com base nos resultados da análise da percolação. Para tal foi necessário determinar, a partir das velocidades de escoamento, os caudais nos pontos das malhas, o que foi feito através de um algoritmo desenvolvido especificamente para o efeito.

### **4.2 Análise da percolação nas quatro barragens**

#### **4.2.1 Barragem de Guilhofrei**

O modelo da barragem de Guilhofrei foi elaborado considerando um perfil na zona central da obra, correspondente ao trecho dos contrafortes. Foram considerados como impermeáveis o maciço rochoso de fundação e o bloco de betão do pé de jusante da barragem. O meio permeável foi assim limitado à zona de alvenaria de pedra granítica ligada com argamassa (Figura 4.1).

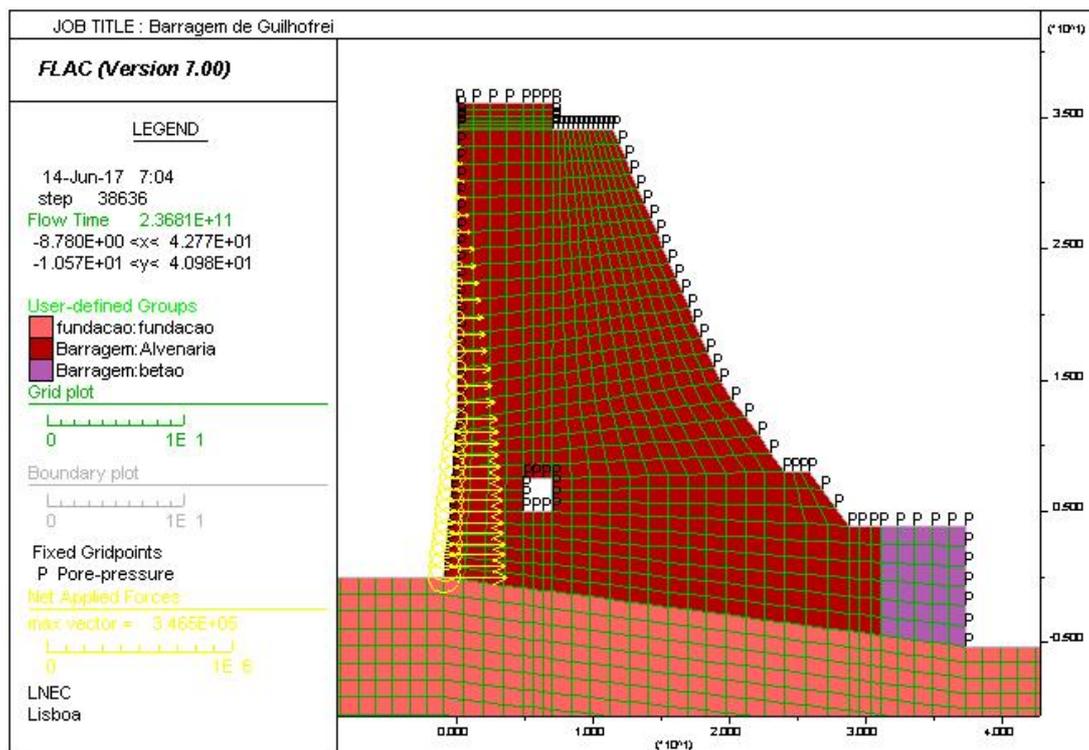


Figura 4.1 - Barragem de Guilhofrei. Modelo para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades

Os caudais infiltrados pelo corpo da barragem, medidos na galeria geral de drenagem entre 13 de abril de 2000 e 8 de março de 2017, são apresentados na Figura 4.2. Neste período de tempo o caudal infiltrado médio total foi de 0,36 litros/min ( $5,87 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ), a que corresponde um caudal médio de 188.000 litros/ano.

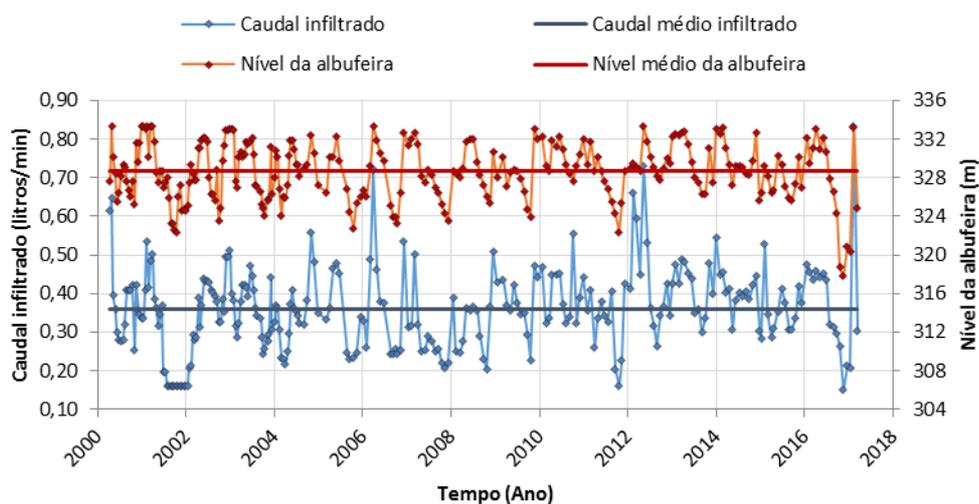


Figura 4.2 - Barragem de Guilhofrei. Caudais médios infiltrados e variação do nível da albufeira entre 2000 e 2017

Considerando que o comprimento da galeria geral de drenagem é de cerca de 1/3 do comprimento total do coroamento, obtém-se um valor médio do caudal afluente à galeria por metro linear de desenvolvimento de  $q = 9,26 \times 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ .

Realizada uma análise paramétrica, obteve-se para o coeficiente de permeabilidade o valor  $k=1,27 \times 10^{-9}$  m/s. Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados do cálculo, em termos de pressões internas e de velocidades de escoamento. Deve referir-se que o caudal recolhido na galeria geral de drenagem corresponde a 86% do total de caudal infiltrado, sendo que o restante afluí ao paramento de jusante. É esta a razão pela qual existem, frequentemente, manchas de humidade em zonas do paramento de jusante.

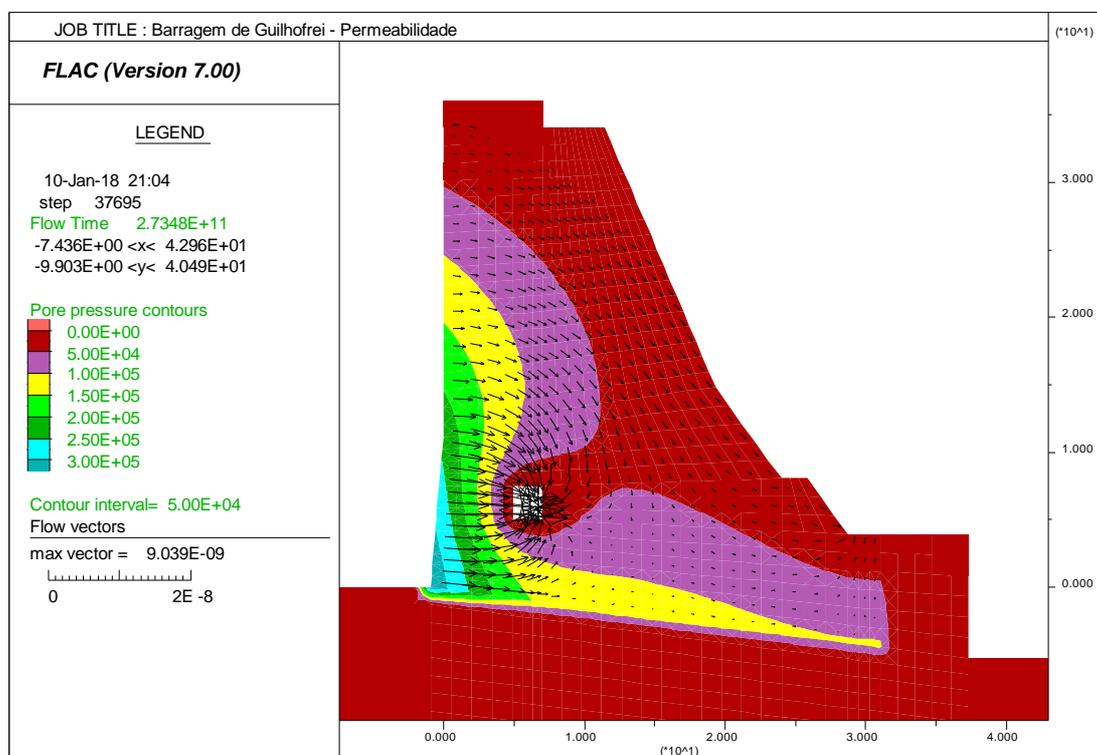


Figura 4.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas

#### 4.2.2 Barragem de Andorinhas

Na barragem de Andorinhas existem diferenças muito significativas, ao longo da galeria geral de drenagem, nos valores dos caudais infiltrados pelo corpo da obra, coletados em drenos da alvenaria (Figura 4.4). Esta diferença acentua-se na passagem das zonas sob os vãos do descarregador para as zonas com contrafortes. Uma vez que os pontos geodésicos, onde se observam deslocamentos, se localizam na zona dos contrafortes, é relevante distinguir, em termos de caudais infiltrados e de características estruturais, as diferentes zonas da barragem. Assim, para representar o que ocorre na zona dos contrafortes, foram considerados apenas os caudais dos drenos DB1, DB2, DB3, DB4, DB9, DB10, DB15 e DB16.

O modelo da barragem de Andorinhas foi elaborado a partir da secção transversal do contraforte central (Figura 4.5). No modelo foi considerada a fundação impermeável e a alvenaria permeável. Dado que a albufeira tem sempre níveis elevados, na análise foi considerada à cota do NPA.

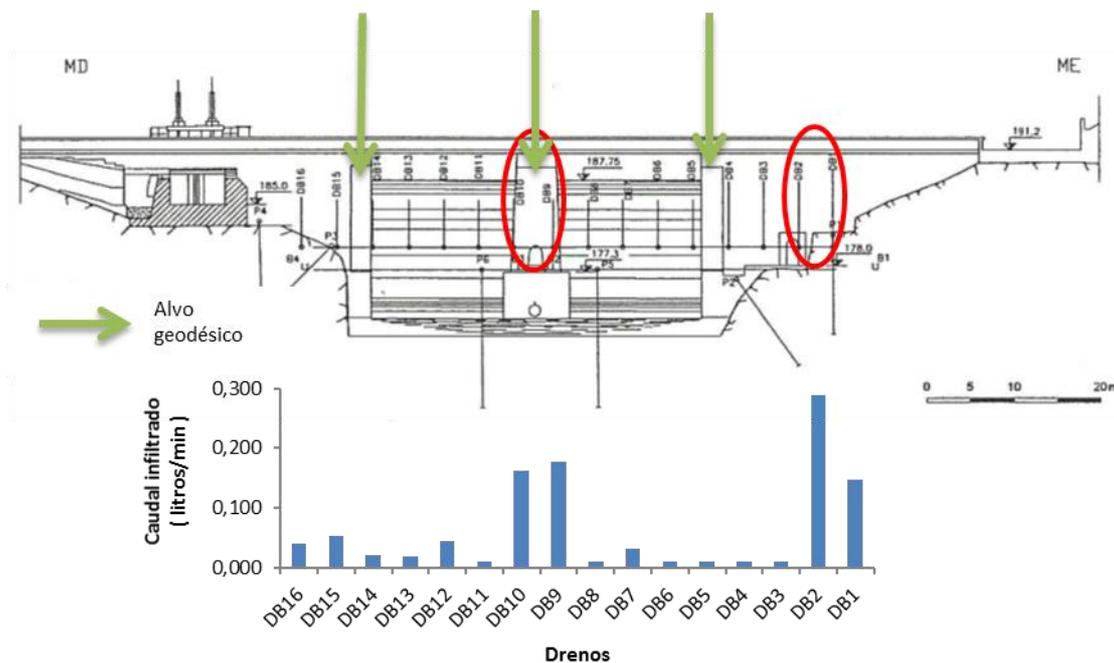


Figura 4.4 - Barragem de Andorinhas. Caudais médios de infiltração pelo corpo da obra, calculados a partir dos valores observados nos drenos da alvenaria entre 1998 e 2017

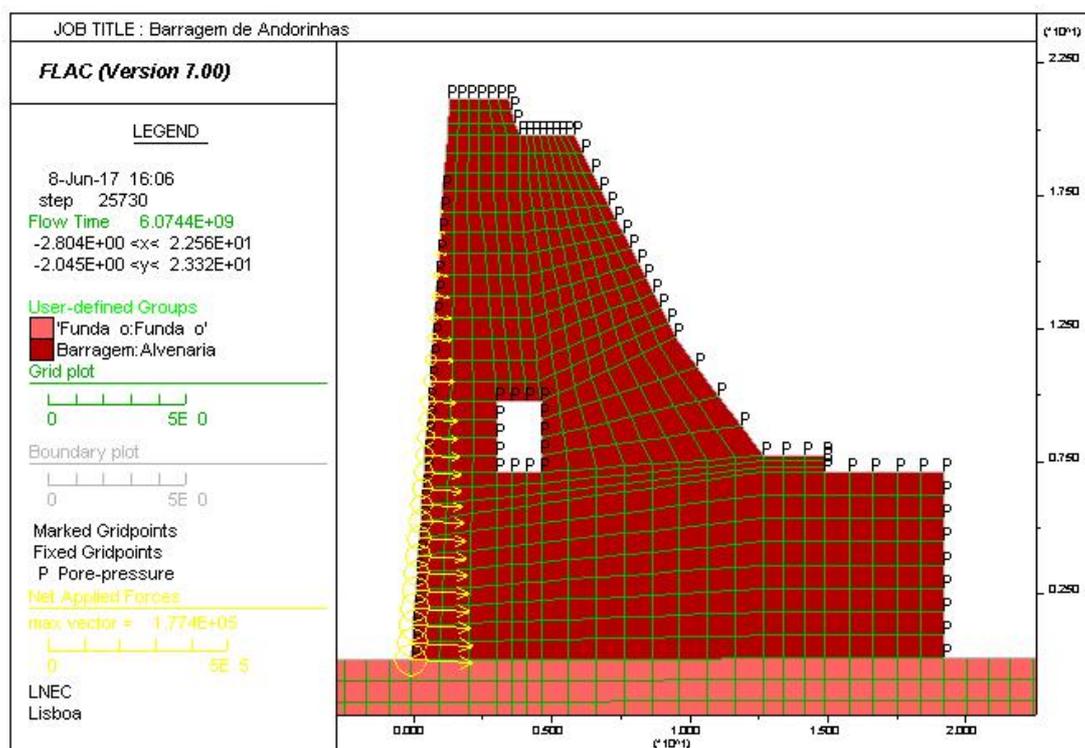
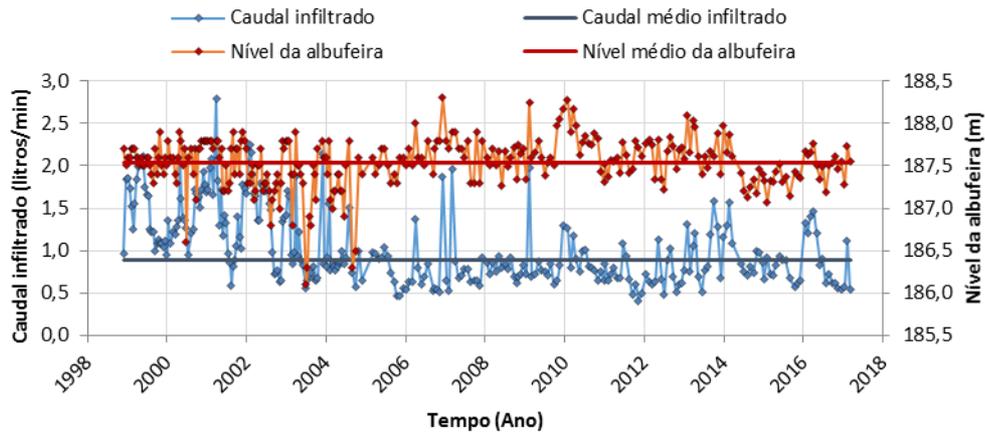


Figura 4.5 - Barragem de Andorinhas. Modelo para análise da percolação no corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades

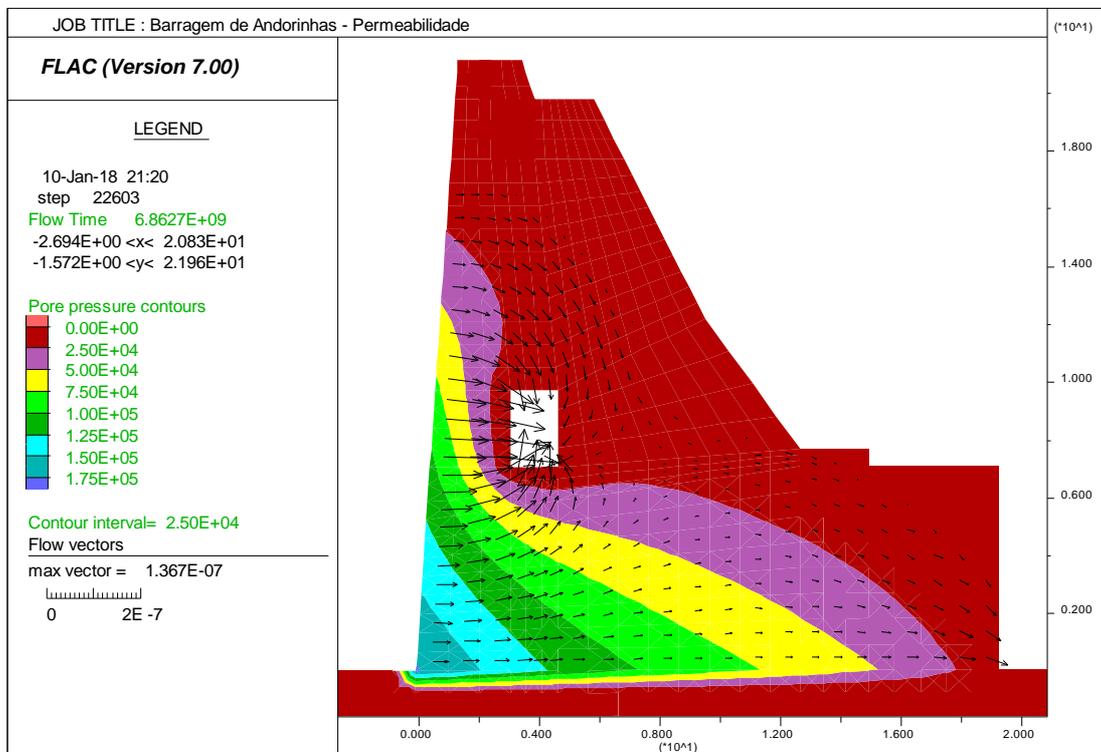
A partir dos caudais infiltrados, medidos entre 2 de dezembro de 1998 e 8 de março de 2017, determinou-se um valor médio do caudal infiltrado total de 0,89 litros/min, a que corresponde um caudal médio de cerca de 550.000 litros/ano (Figura 4.6).



**Figura 4.6 - Barragem de Andorinhas. Caudais médios infiltrados e variação do nível da albufeira entre 1998 e 2017**

Considerando um comprimento da galeria de 50 m (cerca de metade do comprimento total do coroamento) e uma vez que cada vão do descarregador tem uma largura de 16,5 m, o que perfaz um total de 33,0 m, dividiu-se o caudal total infiltrado nas zonas dos contrafortes pelos 17,0 m restantes, obtendo-se um valor por metro linear de desenvolvimento  $q = 8,74 \times 10^{-7} \text{ m}^3/(\text{s.m})$ . Realizada uma análise paramétrica, determinou-se um valor do coeficiente de permeabilidade da alvenaria  $k = 2,67 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ .

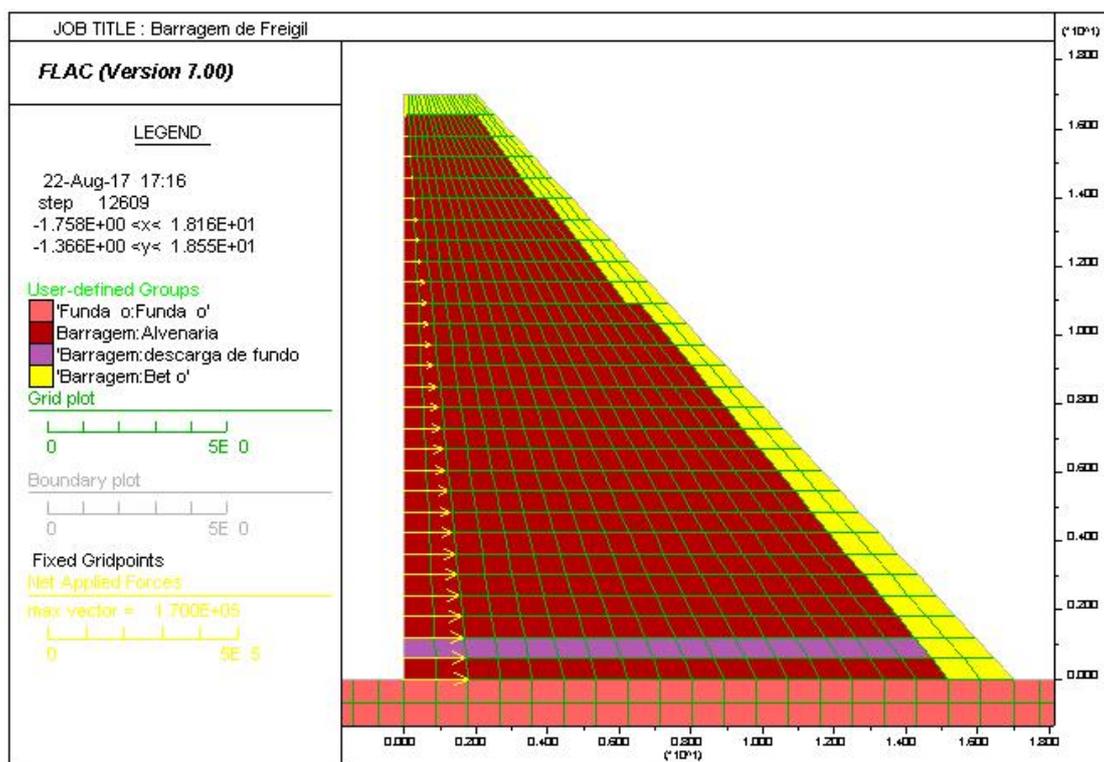
Na Figura 4.7 apresentam-se os resultados do cálculo, em termos de pressões da água e de velocidades de escoamento. O caudal coletado na galeria geral de drenagem corresponde a 89% do total de caudal infiltrado, sendo que o restante aflui ao paramento de jusante, que frequentemente apresenta manchas de humidade em zonas específicas.



**Figura 4.7 - Barragem de Andorinhas. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas**

### 4.2.3 Barragem de Freigil

Na análise da percolação pelo corpo da barragem de Freigil considerou-se, à semelhança dos casos anteriores, um maciço de fundação impermeável. No perfil da barragem individualizou-se a camada de betão de revestimento da soleira descarregadora sobre o paramento de jusante, também admitida como impermeável, e o corpo de alvenaria, permeável. Para simular a chamada de água à galeria da descarga de fundo, considerou-se a fiada inferior de elementos da barragem com uma permeabilidade 1.000 vezes superior à da restante estrutura de alvenaria. Por fim foi simulada a pressão da água a montante à cota do NPA, ou seja, cerca de 17 m acima do pé de montante.



**Figura 4.8 - Barragem de Freigil. Modelo para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades**

A barragem de Freigil tem cinco bicas a jusante (bicas 1 a 5), que coletam as águas infiltradas pelo corpo da obra e pela fundação (Figura 4.9). O facto de existir um revestimento de betão (camada impermeável) no paramento de jusante, faz com que a água infiltrada tenda a encaminhar-se para o fundo do vale, na direção da galeria da descarga de fundo, que acaba por ter uma função semelhante à das tradicionais galerias de drenagem.

À exceção da bica 3, os valores dos caudais recolhidos nas restantes bicas têm pouca coerência com os níveis da albufeira, pelo que as águas recolhidas terão outras origens para além da albufeira. Para esclarecer esta questão, em particular no que se refere ao contributo da percolação com origem em eventuais fendas nas juntas das alvenarias do revestimento do troço de canal de adução que atravessa a barragem do lado da margem esquerda, a EDP procedeu a um conjunto de ensaios nos dias 7, 8, 9 e 12 de junho de 2017 (EDP, 2017). Os resultados dos ensaios, apresentados na Figura 4.10, mostram a existência de uma franca comunicação entre a soleira do canal de adução e a zona da barragem mais próxima do fundo do vale, o que indica a existência de uma percolação de água significativa pelo corpo da barragem quando o canal se encontra com água no interior, com reflexo nos caudais que afluem às bicas 3 e 4. Sem água no canal, na bica 3 os caudais diminuem significativamente para valores da ordem de 30 litros/min e na bica 4 anulam-se, na prática.

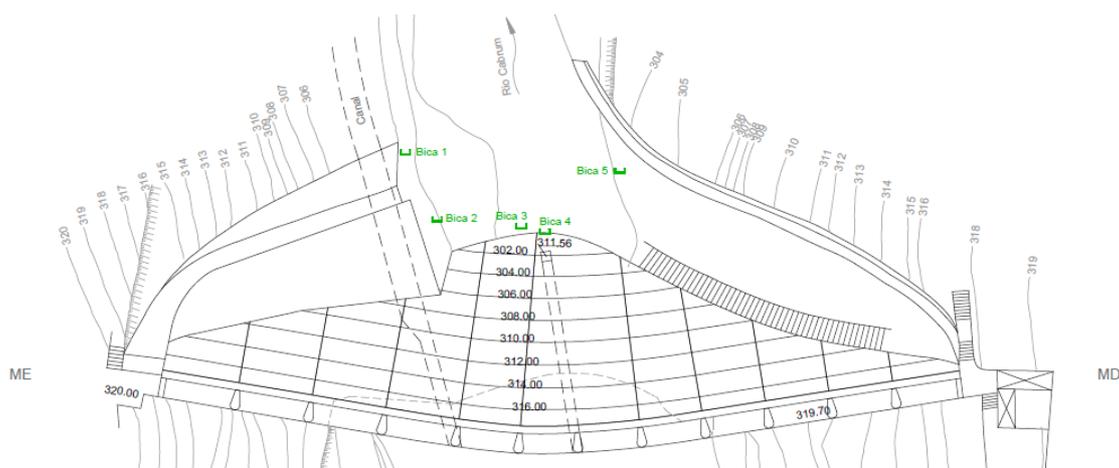


Figura 4.9 - Barragem de Freigil. Planta com a representação das cinco bicas

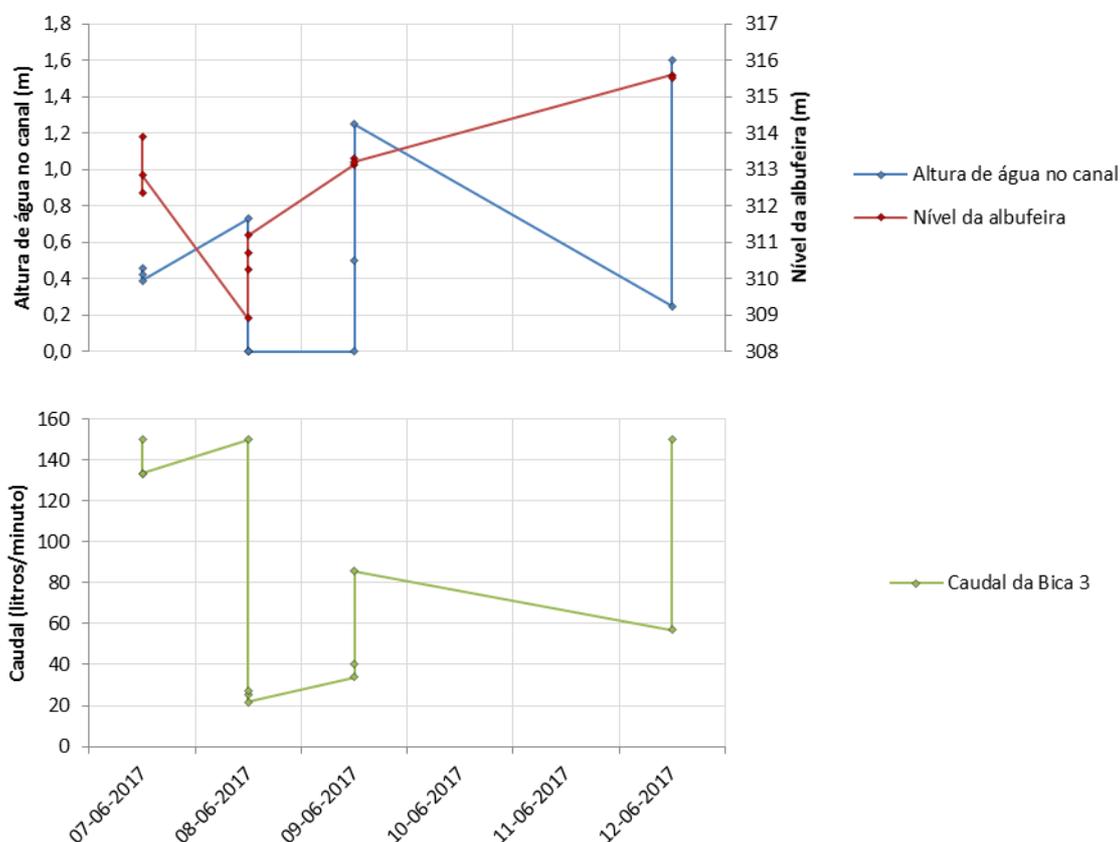
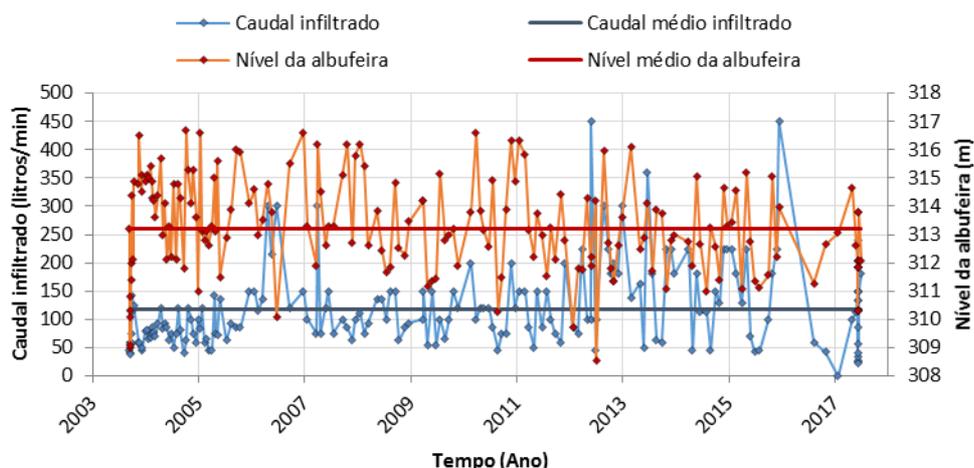


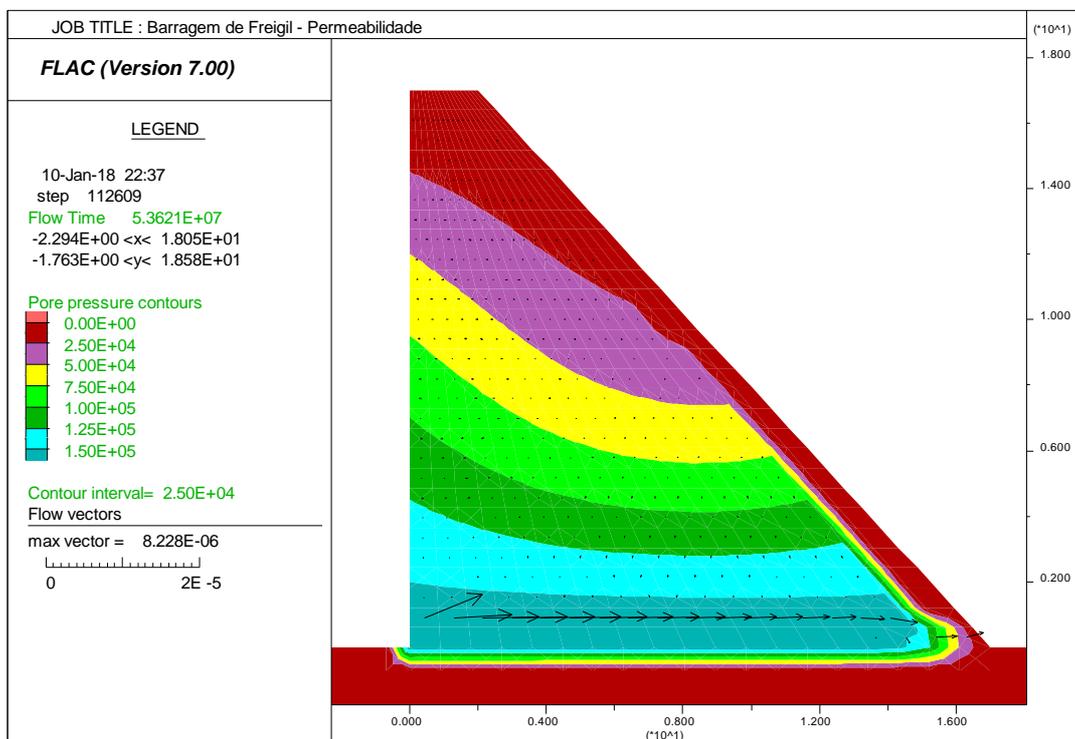
Figura 4.10 - Resultados dos ensaios realizados pela EDP em junho de 2017, para averiguação do contributo nos caudais medidos nas bicas da percolação com origem em eventuais fissuras nas juntas das alvenarias do revestimento do troço de canal de adução

Assim, foram apenas tidos em consideração, para efeitos do estudo da permeabilidade pelo corpo da barragem, os caudais medidos na bica 3. O caudal médio afluyente a esta bica, entre 11 de setembro de 2003 e 29 de junho de 2016, é de 117 litros/min (Figura 4.11), e o nível médio da albufeira é de 313,0 m. Contudo, face aos resultados dos ensaios realizados em junho de 2017, considerou-se, para efeitos da estimativa da permeabilidade das alvenarias da barragem, um caudal médio infiltrado, para a albufeira à cota média de 313,0 m e sem água do canal de adução, de cerca de 30 litros/min ( $5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , a que corresponde cerca de 15.768.000 litros/ano).



**Figura 4.11 - Barragem de Freigil. Caudais medidos na Bica 3 e variação do nível da albufeira entre 2003 e 2017**

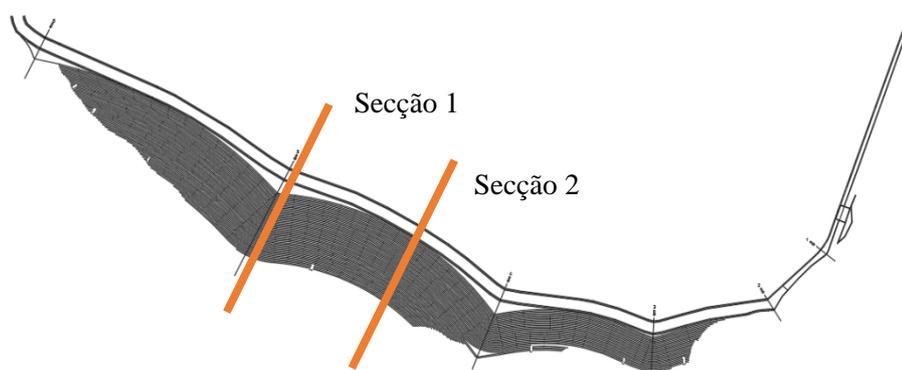
Considerando o caudal  $Q = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e um desenvolvimento da obra de 63 m, o valor médio do caudal por metro linear é de  $q = 7,94 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ . Após uma análise paramétrica, obteve-se um valor naturalmente elevado para o coeficiente de permeabilidade da estrutura de alvenaria,  $k = 2,94 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ . Neste caso, o caudal recolhido a jusante corresponde ao caudal total infiltrado através do paramento de montante.



**Figura 4.12 - Barragem de Freigil. Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas**

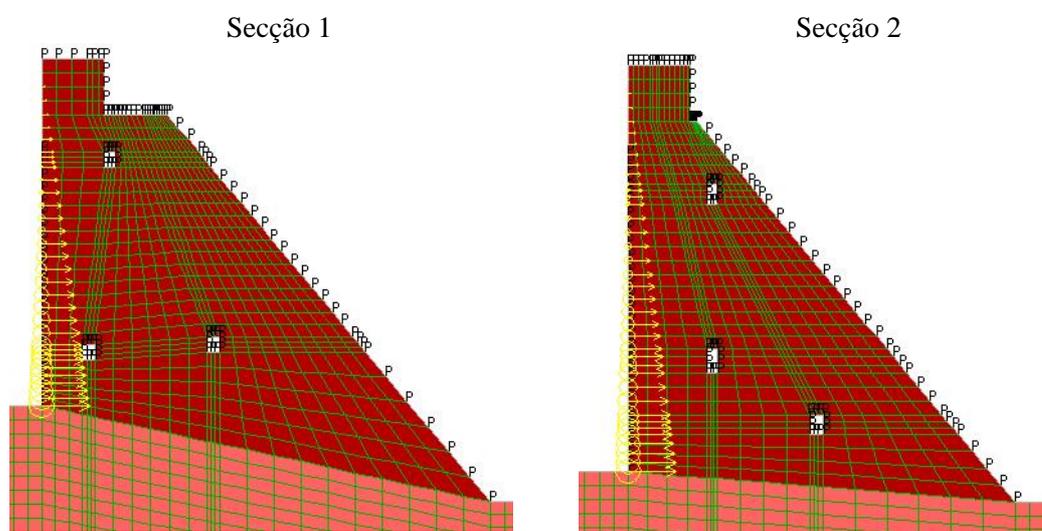
#### 4.2.4 Barragem do Covão do Ferro

No caso da barragem do Covão do Ferro foram considerados dois perfis de estudo, correspondentes aos locais de implantação dos alvos geodésicos PC5 e PC6, no contraforte da margem direita, e do alvo geodésico PC4, na vertical da descarga de fundo, que foram designados, respetivamente, por secções 1 e 2 (Figura 4.13). Foram ainda considerados dois períodos distintos, o primeiro entre 1987 e 1993 e o segundo após as obras de reabilitação de 2004-2006.



**Figura 4.13 - Localização em planta das secções transversais representadas nos modelos planos, localizadas próximas dos pontos de observação de deslocamentos PC4 e PC5.**

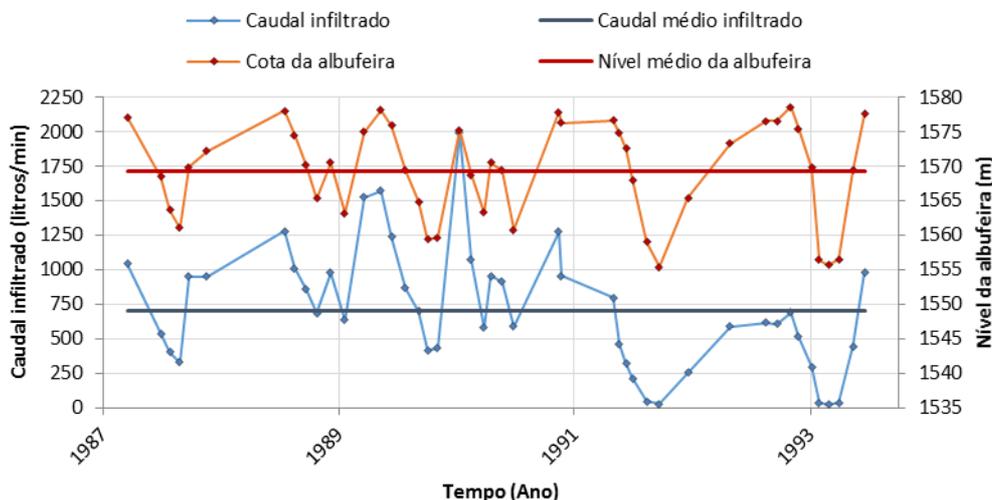
Na análise da percolação pelo corpo da barragem considerou-se o maciço de fundação impermeável e as alvenarias permeáveis. Foram representadas as três galerias existentes na barragem (galeria alta, galeria geral de drenagem e galeria baixa).



**Figura 4.14 – Barragem do Covão do Ferro. Modelos para análise da percolação pelo corpo da obra, com representação das zonas com diferentes permeabilidades (secção 1 à esquerda e secção 2 à direita)**

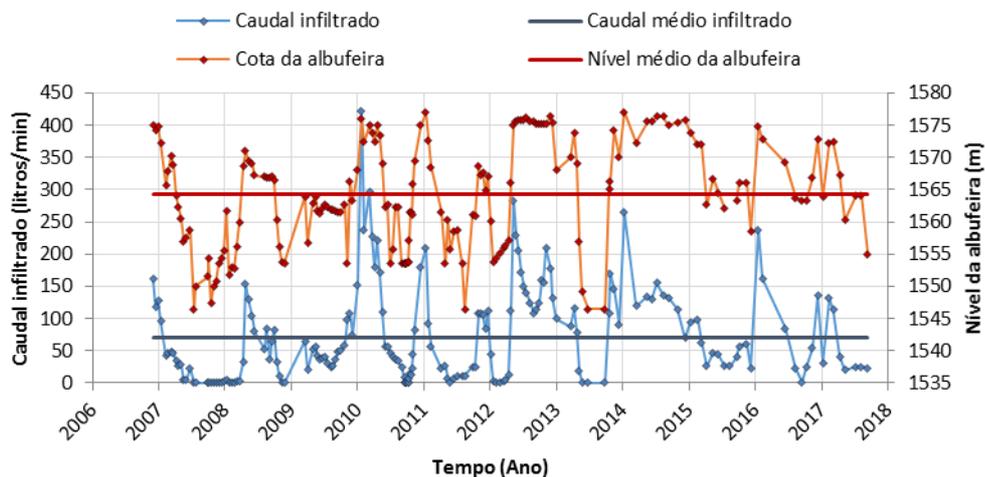
No período de 1987-1993 considerou-se a água a montante a uma cota média de 1575,0 m. No período 2006-2017 a água a montante foi considerada à cota do dreno D1 (1574,4 m), tendo-se simulado o efeito da membrana de impermeabilização através da consideração de um trecho inferior de infiltração de água correspondente a 1/10 da altura do paramento de montante (na restante altura o paramento foi considerado impermeável). Em ambos os casos foi admitida uma pressão de 1 KPa no coroamento e o paramento de jusante, para simulação das condições climáticas de chuva e neve no local da obra.

Para o primeiro período foram considerados os caudais totais infiltrados pelo corpo da barragem, recolhidos a jusante pelas bicas existentes, tendo-se calculado um caudal médio infiltrado de 703,4 litros/min (Figura 4.15), a que corresponde um caudal anual aproximado de 367.920.000 litros (0,368 hm<sup>3</sup>).



**Figura 4.15 – Barragem do Covão do Ferro. Variação do nível da albufeira e caudais totais infiltrados pelo corpo da obra entre 1987 e 1993**

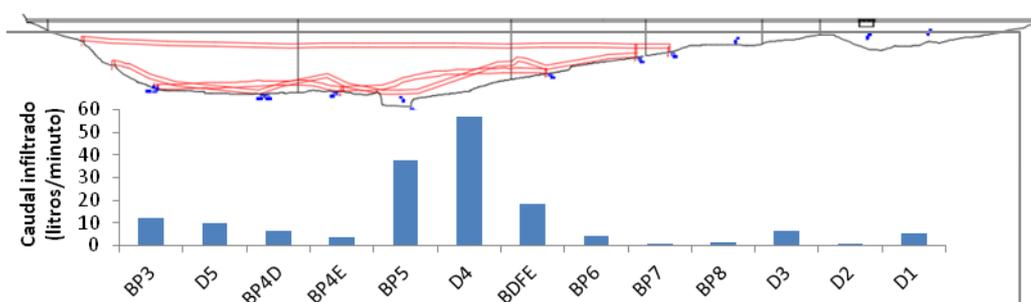
Para o segundo período foram considerados os caudais totais infiltrados pelo corpo da barragem (caudal das bicas menos o caudal dos drenos de fundação), medidos entre 2006 e 2017. Determinou-se um caudal médio infiltrado de 71,2 litros/min (Figura 4.16), a que corresponde aproximadamente um caudal anual de 36.792.000 litros (0,037 hm<sup>3</sup>).



**Figura 4.16 – Barragem do Covão do Ferro. Variação do nível da albufeira e caudais totais infiltrados pelo corpo da obra e drenados na membrana de impermeabilização do paramento de montante, entre 2006 e 2017**

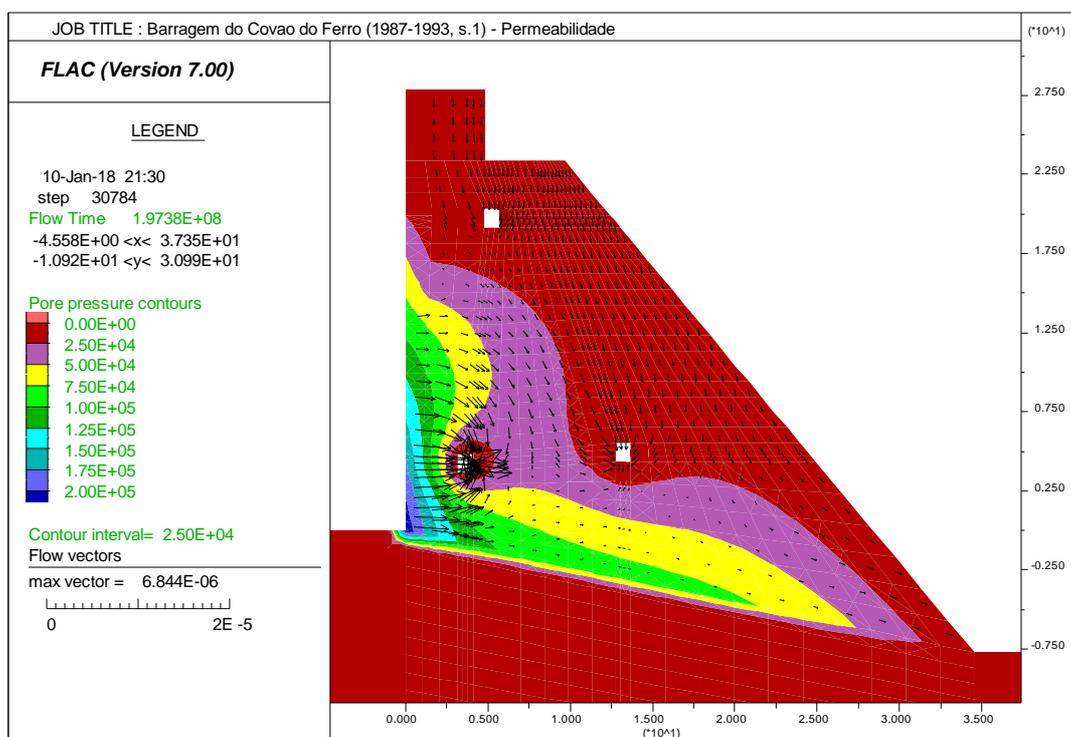
Na Figura 4.17 apresentam-se os valores médios dos caudais infiltrados pelo corpo da obra (bicas BP menos os caudais dos drenos de fundação) e drenados na membrana de impermeabilização do paramento de montante (drenos D1 a D5), entre 2006 e 2017, para níveis da albufeira acima da

cota 1565,74 m. Pode notar-se que os caudais drenados na membrana são da ordem de grandeza dos caudais infiltrados pelo corpo da obra.



**Figura 4.17 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios dos caudais infiltrados pelo corpo da obra (bicas BP) e drenados na membrana de impermeabilização do paramento de montante (drenos D1 a D5), entre 2006 e 2017, para níveis da albufeira acima da cota 1565,74 m**

Apresentam-se, da Figura 4.18 à Figura 4.21, os resultados relevantes obtidos na análise do escoamento através do corpo da barragem, para os dois períodos em análise.



**Figura 4.18 - Barragem do Covão do Ferro (secção 1) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 1987 e 1993.**

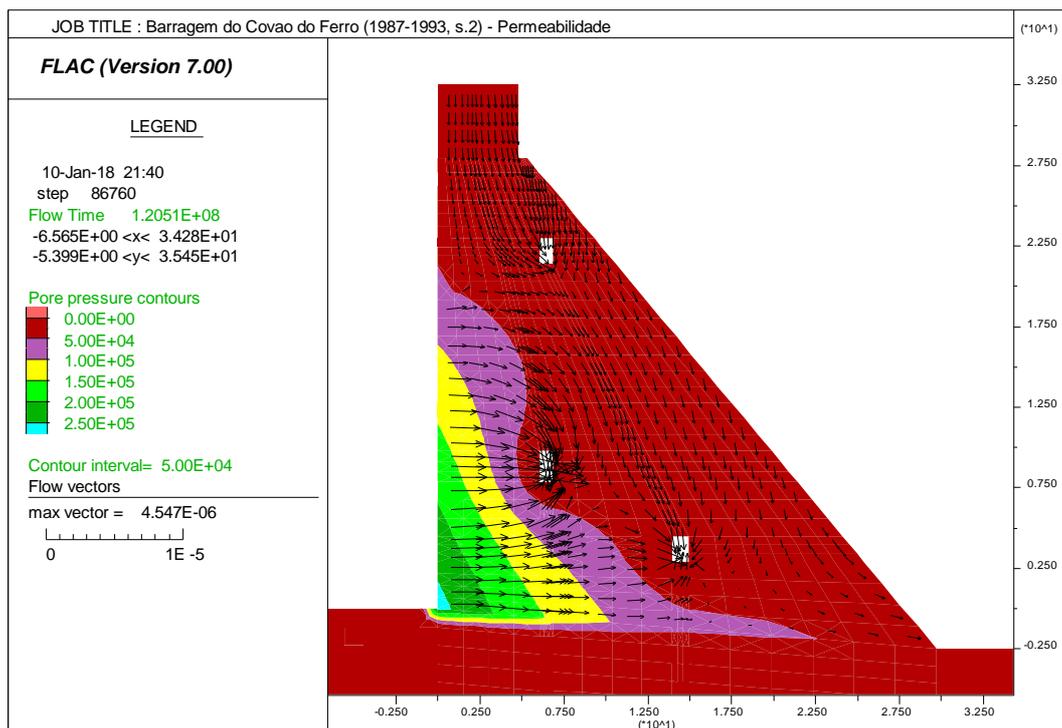


Figura 4.19 - Barragem do Covão do Ferro (secção 2) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 1987 e 1993.

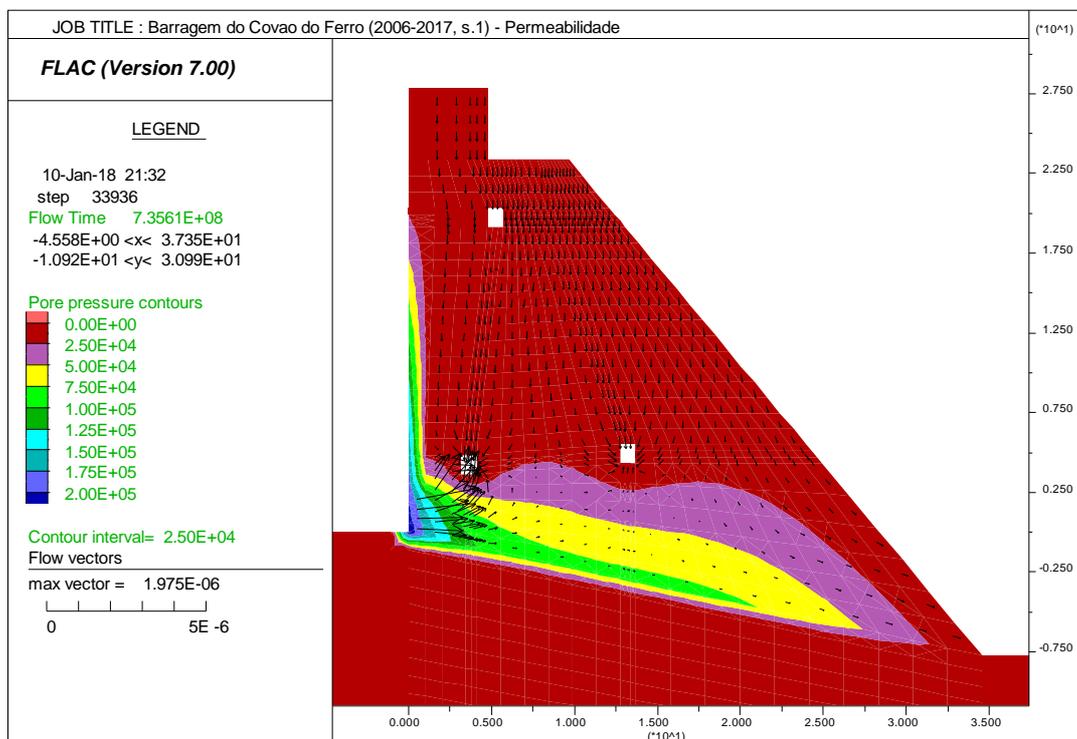


Figura 4.20 - Barragem do Covão do Ferro (secção 1) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 2006 e 2017.

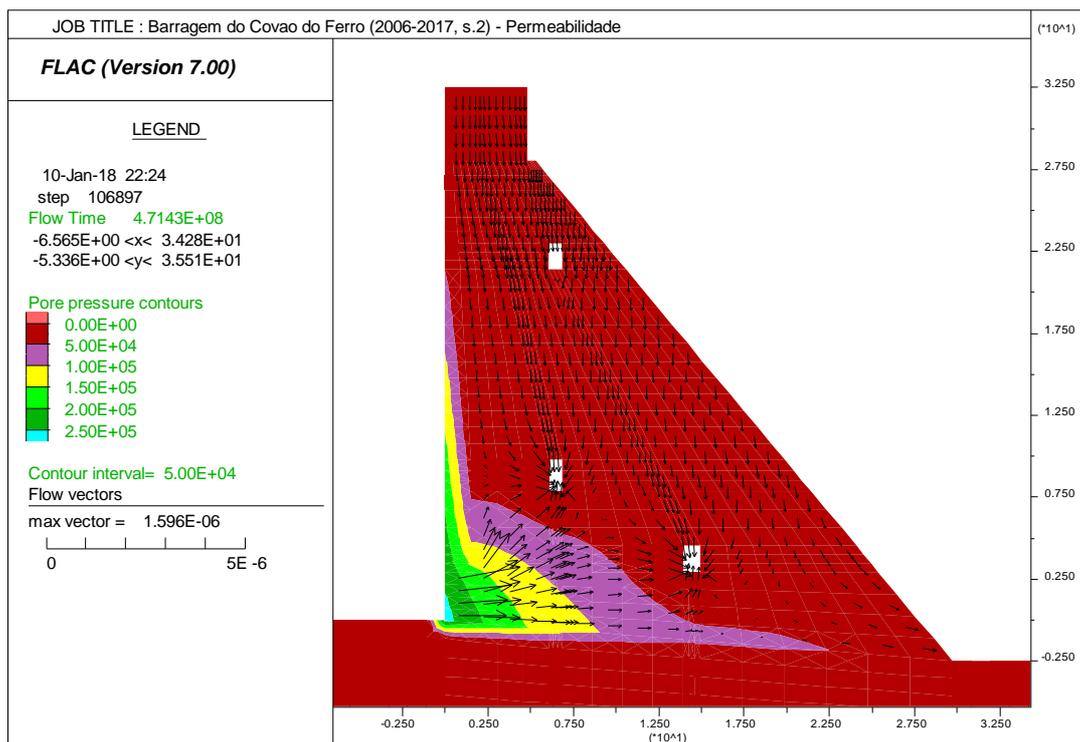


Figura 4.21 - Barragem do Covão do Ferro (secção 2) - Resultados da análise de percolação pelo corpo da obra, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, para o período entre 2006 e 2017.

Considerando um desenvolvimento da obra de 290 m e os resultados da análise paramétrica dos modelos planos, apresentam-se no Quadro 4.1 os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade.

Quadro 4.1 - Valores médios do coeficiente de permeabilidade das diferentes secções da barragem do Covão do Ferro para os dois períodos analisados

Secção	Coeficiente de permeabilidade, k (m/s)	
	Período entre 1987 e 1993	Período entre 2006 e 2017
Secção 1	$9,3 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-7}$
Secção 2	$10,7 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7}$

Estima-se assim que a permeabilidade das alvenarias do corpo da barragem tenha diminuído, após as obras de reabilitação de 2004-2006, para cerca de 32% do valor correspondente ao período entre 1987 e 1993.

### 4.3 Análise crítica dos resultados

No Quadro 4.2 apresenta-se uma síntese dos valores estimados para os coeficientes de permeabilidade média das alvenarias das quatro barragens portuguesas em estudo, Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, obtidos através da análise da percolação com modelos numéricos resolvidos com o programa FLAC 7.0. Os valores variam entre  $1,3 \times 10^{-9}$  m/s, para a barragem de Guilhofrei, que é a mais impermeável, e  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s, para a barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1993, cujas alvenarias eram mais permeáveis. Entre estes dois valores existe uma razão de cerca de 800.

**Quadro 4.2 - Valores médios dos coeficientes de permeabilidade das alvenarias das barragens portuguesas em estudo, estimados a partir dos resultados obtidos na análise da percolação através do corpo das obras**

Barragem	Ano de construção/grande reabilitação	Período analisado	$k$ médio ( $\times 10^{-9}$ m/s)
Guilhofrei	1938	2000 a 2017	1,3
Andorinhas	1945	2003 a 2017	27
Freigil	1955	1999 a 2017	290
Covão do Ferro	1956	1987 a 1993	1000
	2006	2006 a 2017	325

Nos estudos realizados no âmbito do projeto de reabilitação da barragem da Póvoa (construída em 1928), obteve-se um coeficiente de permeabilidade, através de ensaios “in situ” do tipo Lefranc, de cerca de  $5,5 \times 10^{-6}$  m/s (Miranda et al., 2005).

No Quadro 4.3 apresentam-se os valores médios dos coeficientes de permeabilidade de doze barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas (Royet et al., 2013).

**Quadro 4.3 - Valores médios de permeabilidade de doze barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas**

Barragem	Ano de construção	$k$ médio (m/s)
St-Ferreol	1672	$2,35 \times 10^{-6}$
Lampy	1782	$6,42 \times 10^{-7}$
Tillot	1834	$4,50 \times 10^{-4}$
Bosmeleac	1839	$2,26 \times 10^{-4}$
Settons	1858	$2,04 \times 10^{-7}$
Gouffre d'Enfer	1866	$1,65 \times 10^{-7}$
Labourne	1878	$1,58 \times 10^{-6}$
Alfed	1887	$1,60 \times 10^{-6}$
Ban de Champagney	1905	$5,50 \times 10^{-6}$
Balme Rencurel	1912	$3,00 \times 10^{-5}$
Charpal	1932	$5,50 \times 10^{-6}$

Na Figura 4.22 apresenta-se a comparação entre os valores dos coeficientes de permeabilidade das barragens que constam do Quadro 4.2 e do Quadro 4.3, organizada em função do ano de construção das obras ou de grande reabilitação. Pode notar-se que os valores estimados para as quatro barragens portuguesas correspondem a estruturas com permeabilidade de ordem de grandeza idêntica às barragens francesas mais impermeáveis.

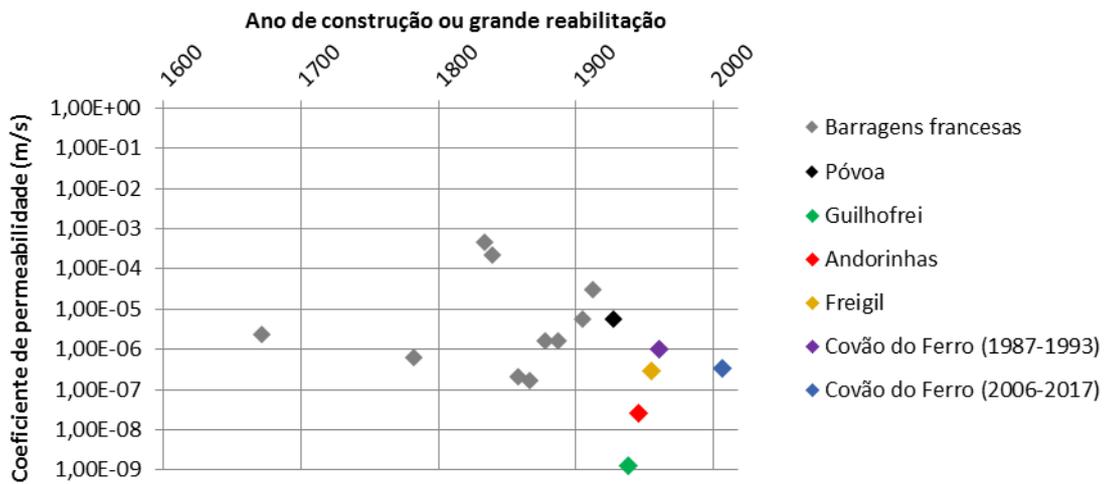


Figura 4.22 - Comparação dos valores dos coeficientes de permeabilidade de barragens de alvenaria francesas e da barragem da Póvoa, obtidos em ensaios, e das quatro barragens portuguesas em estudo (valores estimados a partir da análise da percolação pelo seu corpo)

(página deixada deliberadamente em branco)

## 5. Quantificação simplificada da lixiviação das argamassas a partir dos caudais infiltrados e das características das águas

### 5.1 Metodologia de avaliação da lixiviação das argamassas

A análise das características físico-químicas da água da albufeira e da água drenada tem vindo a ser feita pelo LNEC durante as inspeções, a partir das amostras colhidas para o efeito. Nas campanhas recorre-se, em geral, a uma metodologia simplificada para a determinação dos parâmetros físico-químicos das águas, designadamente a condutividade elétrica, temperatura, pH e pH de saturação (pHs) após o contacto com o carbonato de cálcio.

A condutividade elétrica permite estimar o teor de sais dissolvidos (TSD) e inferir sobre o potencial agressivo das águas em termos de capacidade dissolvente. A partir de valores obtidos nas análises das águas de cerca de 40 barragens portuguesas, foi estabelecida a relação  $TSD (mg/l) = 0,72 C + 6,07$ , sendo C a condutividade elétrica expressa em  $\mu S/cm$ . Para um valor de  $TSD \leq 100 mg/l$  as águas têm um elevado poder dissolvente; no caso de  $100 < TSD \leq 300 mg/l$  o potencial agressivo é baixo; para  $300 < TSD \leq 800 mg/l$  o potencial agressivo é quase nulo; e para  $TSD > 800 mg/l$  existe uma grande probabilidade de existência de elevados teores de iões agressivos ao betão (Silva, 1992).

As águas ácidas, com  $pH \leq 6$ , têm, em geral, um elevado potencial agressivo para os materiais; as águas neutras ( $6 \leq pH \leq 8$ ) podem ser agressivas se a sua mineralização, normalmente avaliada a partir do teor de sais dissolvidos (TSD), for baixa; se  $8 < pH \leq 10$ , o potencial agressivo é pequeno; e no caso de águas alcalinas ( $pH > 10$ ) existe um potencial agressivo para os minerais silicatados.

O índice de agressividade das águas, obtido pela diferença  $i = pH - pHs$ , dá uma medida da agressividade da água para os cimentos dos betões, argamassas e caldas de injeção (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1 - Agressividade das águas para os cimentos dos betões, argamassas e caldas de injeção, estimadas a partir do índice de agressividade  $i = pH - pHs$**

Índice de agressividade (i)	Agressividade das águas
$i \leq -3$	Fortemente agressivas
$-3 < i \leq -1$	Medianamente agressivas
$-1 < i \leq 1$	Pouco agressivas
$i > 1$	Não agressivas

Muitas vezes, e de uma forma ainda mais simplificada, considera-se que  $i < 0$  indica que a água é agressiva para o carbonato de cálcio e  $i > 0$  indica que a água pode não ser agressiva e que pode até ser incrustante (Silva, 1992).

Apresentam-se, de seguida, os principais resultados obtidos nas campanhas realizadas pelo LNEC nas quatro barragens em estudo, de modo a se fazer a quantificação simplificada da lixiviação das argamassas a partir dos caudais infiltrados e das características das águas da albufeira e infiltradas.

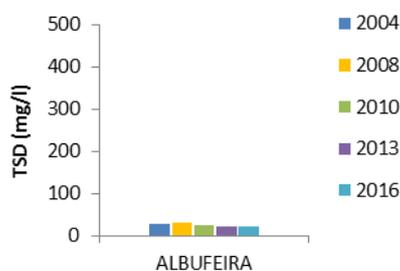
As análises das águas foram realizadas sobre amostras recolhidas nas albufeiras a várias profundidades, usando uma sonda de captação junto ao paramento de montante, na zona central de cada barragem, e sobre amostras colhidas nos terminais de alguns drenos nas galerias gerais de drenagem e em bicas totalizadoras. Os quadros com os resultados numéricos são apresentados no Anexo I, para as quatro barragens.

## 5.2 Quantificação da lixiviação das argamassas nos quatro casos de estudo

### 5.2.1 Barragem de Guilhofrei

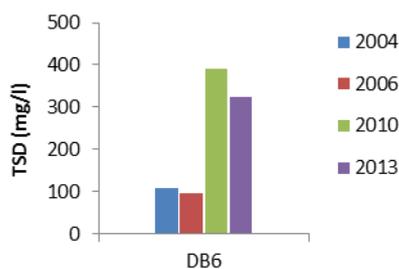
Realizaram-se inspeções à barragem de Guilhofrei, nas quais foram recolhidas amostras da água da albufeira (a diferentes profundidades) e dos drenos do corpo da barragem localizados na galeria geral de drenagem, em 2004, 2006, 2008, 2010, 2013 e 2016.

Na Figura 5.1 apresenta-se um gráfico com os valores médios estimados do TSD para as amostras de água da albufeira, verificando-se que os valores variam pouco de ano para ano, estando entre 20 e 30 mg/l.



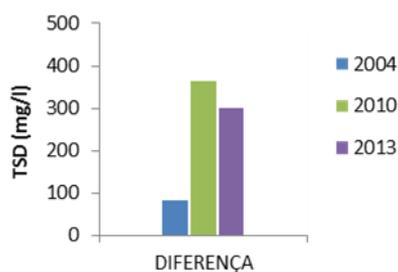
**Figura 5.1 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2004, 2008, 2010, 2013 e 2016**

Na Figura 5.2 apresentam-se os valores estimados do TSD para as amostras de água recolhidas no dreno da alvenaria DB6, que é o único dreno que tem tido um caudal significativo.



**Figura 5.2 - Barragem de Guilhofrei. Valores do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas do dreno DB6 em 2004, 2006, 2010 e 2013**

Os valores do TSD da água infiltrada variam entre 100 e 400 mg/l, pelo que se verifica um aumento da mineralização da água depois de percolar pelo corpo da barragem. Na Figura 5.3 representa-se a diferença de valores do TSD entre a água infiltrada e a água da albufeira.



**Figura 5.3 - Barragem de Guilhofrei. Valores da diferença do TSD da água infiltrada e da água da albufeira, em 2004, 2010 e 2013**

Os valores da diferença do TSD de 2004 são muito inferiores aos valores de 2010 ou 2013. Isto deve-se à menor acidez da água da albufeira em 2004, pois encontrava-se, respetivamente, com pH médio de 6,83, 5,33 e 5,86 nas épocas das inspeções efetuadas. O índice de agressividade tem valores concomitantes com o pH, tendo valores médios de -1,69 (águas medianamente agressivas), -3,28 e -3,06 (águas muito agressivas) em 2004, 2010 e 2013, respetivamente.



**Figura 5.4 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios de pH e de índice de agressividade da água da albufeira em 2004, 2010 e 2013**

Como referido no capítulo anterior, os caudais infiltrados pelo corpo da barragem de Guilhofrei, afluentes à galeria geral de drenagem, têm um valor médio de 0,36 litros/min. Este caudal é de cerca de 86% do total infiltrado, pelo que em média infiltram-se, por toda a barragem, cerca de 220.000 litros/ano.

**Quadro 5.2 - Barragem de Guilhofrei. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspeções realizadas entre 2004 e 2016**

TSD das águas da albufeira (mg/l)	TSD das águas do dreno DB06 (mg/l)	Diferença (mg/l)
25,24	229,81	204,57

Considerando a diferença do TSD das águas infiltradas e da albufeira e valor do caudal infiltrado pelo corpo da barragem, pode estimar-se a quantidade média de massa dissolvida devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação pelos caudais repassados, que é de cerca de 45 kg/ano. Considerando um valor de massa volúmica de 2.400 kg/m<sup>3</sup> e um volume de alvenaria da obra de 55.000 m<sup>3</sup>, a massa total da barragem é de 1,32x10<sup>8</sup> kg, pelo que a quantidade de material dissolvido em cada ano, por efeito de lixiviação causada apenas pela água infiltrada a partir do paramento de montante, corresponde a 0,000034 % da massa total da barragem, sendo cerca de 0,8 g/m<sup>3</sup>.

## 5.2.2 Barragem de Andorinhas

Efetuar-se inspeções à barragem de Andorinhas, com recolha de amostras da água da albufeira (a diferentes profundidades) e dos drenos da alvenaria localizados na galeria geral de drenagem, em 2004, 2006, 2008, 2010, 2013 e 2016 (nas mesmas semanas de realização das inspeções à barragem de Guilhofrei, que está geograficamente próxima).

Na Figura 5.5 apresenta-se um gráfico com os valores médios do TSD estimados para as amostras de água da albufeira, verificando-se que os valores variam pouco de ano para ano, estando compreendidos entre 20 e 30 mg/l (valores idênticos aos obtidos na albufeira da barragem de Guilhofrei).

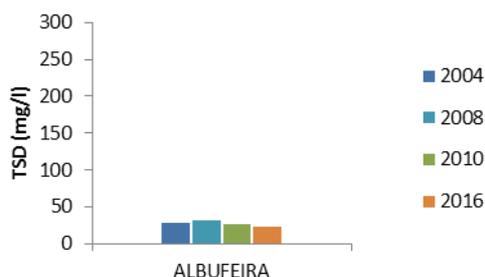


Figura 5.5 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2004, 2008, 2010 e 2016

Na Figura 5.6 apresentam-se os valores médios do TSD estimados para as amostras de água recolhidas nos drenos DB1, DB2, DB9, DB10 e DB15 da galeria geral de drenagem (drenos situados nas zonas de contrafortes, que são os que têm tido caudal).

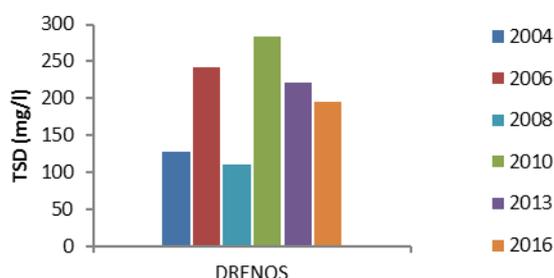


Figura 5.6 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas dos drenos da alvenaria em 2004, 2006, 2008, 2010, 2013 e 2016

Os valores médios do TSD das águas infiltradas estão compreendidos entre 100 e 300 mg/l. Verifica-se assim um aumento do TSD, como esperado, das águas da albufeira para as águas colhidas na galeria geral de drenagem. Na Figura 5.7 apresenta-se a diferença de valores médios do TSD, devida à percolação da água através do corpo da barragem.

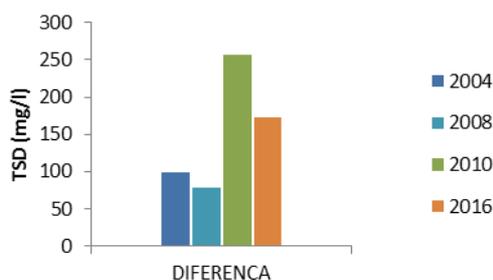


Figura 5.7 - Barragem de Andorinhas. Valores da diferença do TSD da água infiltrada e da água da albufeira, em 2004, 2008, 2010 e 2016

Nesta barragem parece não haver uma relação de causalidade entre a acidez da água da albufeira e a capacidade de dissolução de sais, já que em 2004 e 2008, anos em que se mediram menores pH (sendo então a água mais ácida e mais agressiva), foram dissolvidos menos sais na percolação da água através do corpo da obra.

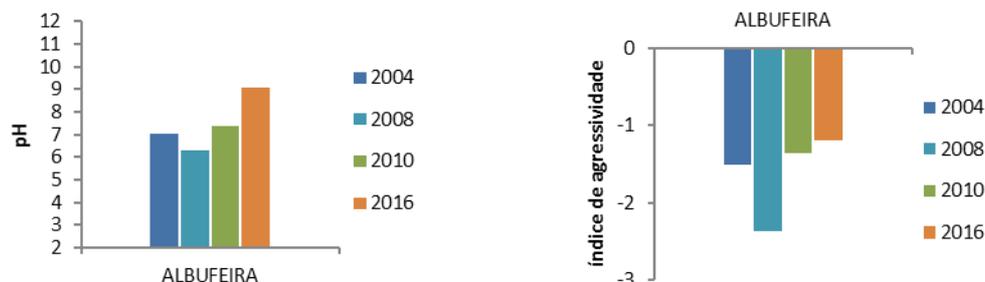


Figura 5.8 - Barragem de Andorinhas. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira e 2004, 2010 e 2013

No capítulo 4 estimou-se, para a barragem de Andorinhas, um caudal médio infiltrado na zona de contraforte de 0,892 litros/min. Estimou-se ainda que este valor corresponderia a 89% do caudal total infiltrado, pelo que em média repassam pela barragem cerca de 527.000 litros/ano.

Quadro 5.3 - Barragem de Andorinhas. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspeções realizadas entre 2004 e 2016

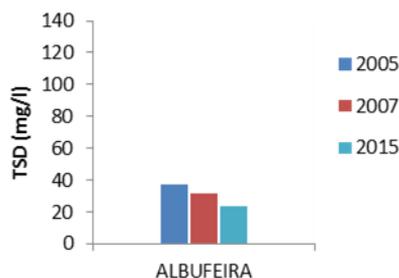
TSD das águas da albufeira (mg/l)	TSD das águas dos drenos da alvenaria nas zonas dos contrafortes (mg/l)	Diferença (mg/l)
27,33	179,05	151,72

Considerando a diferença do TSD das águas infiltradas e da albufeira e valor do caudal infiltrado pelo corpo da barragem, pode estimar-se a quantidade média de massa dissolvida devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação pelos caudais repassados, que é de cerca de 80 kg/ano. A barragem de Andorinhas tem um volume de alvenaria de 12.000 m<sup>3</sup>, correspondendo cerca de 6.500 m<sup>3</sup> à zona dos descarregadores. Como nestas zonas não existem praticamente repasses, e consequentemente não há dissolução dos materiais cimentícios das argamassas, considerou-se, para efeitos de cálculo, apenas o volume restante barragem. Assim, estimou-se que a quantidade dissolvida por ano corresponde a cerca de 0,0006% da massa, ou seja, aproximadamente 14,5 g/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3 Barragem de Freigil

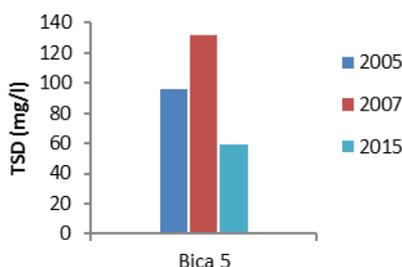
Nas inspeções realizadas à barragem de Freigil em 2005, 2007 e 2015 foram recolhidas amostras da água da albufeira (a diferentes profundidades) e das bicas localizadas no pé de jusante da barragem.

Na Figura 5.9 apresenta-se um gráfico com os valores médios do TSD estimados para as amostras de água da albufeira, verificando-se que variam entre cerca de 20 e 40 mg/l.



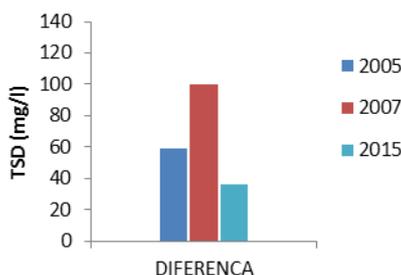
**Figura 5.9 - Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2005, 2007 e 2015**

Na Figura 5.10 apresentam-se as estimativas do TSD para as amostras de água recolhidas na bica 5. Trata-se da única bica onde se verificam alterações significativas da condutividade elétrica entre a água da albufeira e a água recolhida nas bicas. Confirma-se o referido no capítulo 4 a propósito dos caudais infiltrados nesta obra, já que as águas repassadas, nomeadamente as coletadas na bica 3, que foram consideradas nos estudos de percolação pelo corpo da obra, dizem respeito a águas que praticamente não percolam através das alvenarias da barragem, tendo ligações quase diretas entre o canal de adução e os sítios onde são coletadas.



**Figura 5.10 – Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas da bica 5 em 2005, 2007 e 2015**

O aumento dos valores estimados do TSD entre a albufeira e a água recolhida na bica 5 varia entre 60 e 140 mg/l. Na Figura 5.11 apresenta-se a diferença de valores do TSD devida à passagem da água da albufeira através da barragem.



**Figura 5.11 - Barragem de Freigil. Valores da diferença do TSD da água coletada na bica 5 e da água da albufeira, em 2005, 2007 e 2015**

Mais uma vez os valores diferem de ano para ano, uma vez que a acidez e o índice de agressividade da água da albufeira também variam. O pH da água, que corresponde a águas neutras em todos os anos, não potencia a dissolução de sais com as proporções verificadas nas barragens de Guilhofrei e Andorinas. Em 2007 o pH da água era um pouco inferior a 7, estando assim ligeiramente mais ácida que nos outros anos, pelo que teve uma capacidade maior de dissolução de sais superior, como se pode confirmar na Figura 5.11.



Figura 5.12 - Barragem de Freigil. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira em 2005, 2007 e 2015

A água repassada através da barragem é de cerca de 30 litros/min (ver capítulo 4), que corresponde a cerca de 15.768.000 litros/ano.

Quadro 5.4 - Barragem de Freigil. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspeções realizadas entre 2005 e 2015

TSD das águas da albufeira (mg/l)	TSD das águas da bica 5 (mg/l)	Diferença (mg/l)
30,79	95,83	65,04

A massa dissolvida da barragem de Freigil, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação causadas apenas pela passagem de água pelo corpo da obra, é cerca de 1.000 kg/ano. Considerando um valor de massa volúmica de 2.400 kg/m<sup>3</sup> e tendo a barragem de Freigil um volume de alvenaria próximo de 5.000 m<sup>3</sup>, a massa total da barragem é de 12x10<sup>6</sup> kg, pelo que a quantidade de material dissolvido em cada ano pelo efeito da lixiviação das argamassas corresponde a 0,008% da massa total da barragem, sendo de cerca de 200 g/m<sup>3</sup>.

### 5.2.4 Barragem do Covão do Ferro

As inspeções à barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1993, em que foram recolhidas amostras da água da albufeira, a diferentes profundidades, e da água das bicas localizadas na galeria alta e na galeria geral de drenagem, foram realizadas nos anos de 1988, 1989 e 1993, não tendo sido neste último ano feita qualquer análise à água da albufeira.

Na Figura 5.13 apresenta-se um gráfico com os valores médios do TSD estimados para as amostras de água da albufeira, verificando-se que os valores estão compreendidos entre 15 e 18 mg/l.

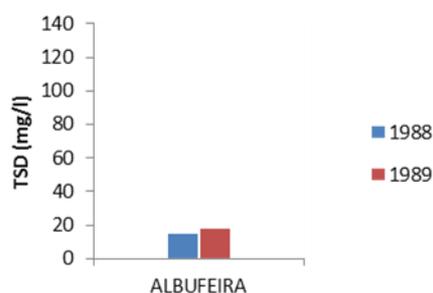
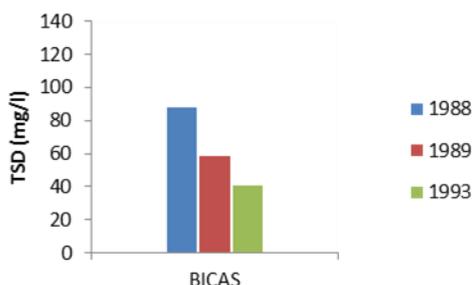


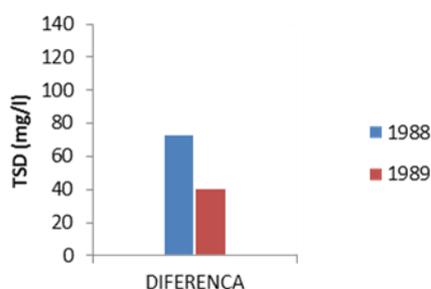
Figura 5.13 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 1988 e 1989.

Na Figura 5.14 apresentam-se os valores médios do TSD estimados para as amostras de água recolhidas nas bicas. Os valores variam entre 39 e 91 mg/l, pelo que aumentou significativamente a mineralização da água na sua passagem através do corpo da obra.



**Figura 5.14 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas das bicas em 1988, 1989 e 1993**

Na Figura 5.15 representa-se a diferença do TSD da água coletada nas bicas e da albufeira, sendo que em média são dissolvidos cerca de 57 mg/l.

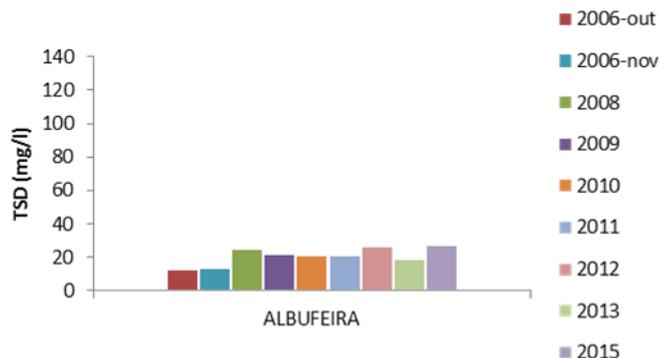


**Figura 5.15 - Barragem do Covão do Ferro. Valores da diferença do TSD da água coletada nas bicas e da água da albufeira, em 1988 e 1989**

**Quadro 5.5 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspeções realizadas em 1988 e 1989**

TSD das águas da albufeira (mg/l)	TSD das águas dos drenos da máscara e das bicas (mg/l)	Diferença (mg/l)
16,5	62,3	56,8

A água repassada através da barragem é de cerca de 700 litros/min (ver capítulo 4), que corresponde a cerca de 367.920.000 litros/ano. A massa dissolvida na obra, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação causadas apenas pela passagem de água pelo corpo da barragem, é cerca de 20.900 kg/ano. Considerando um valor de massa volúmica de 2.400 kg/m<sup>3</sup> e tendo a barragem um volume de alvenaria próximo de 111.000 m<sup>3</sup>, a massa total da barragem é de 2,66x10<sup>8</sup> kg, pelo que a quantidade de material dissolvido em cada ano pelo efeito da lixiviação das argamassas corresponde a 0,008% da massa total da barragem, sendo de cerca de 188 g/m<sup>3</sup>. Nas inspeções à barragem do Covão do Ferro, após as obras de reabilitação de 2004-2006, realizadas em 2006 (outubro e novembro), 2008, 2011, 2013 e 2015, foram recolhidas amostras da água da albufeira, a diferentes profundidades, e da água coletada nas bicas totalizadoras. Nas inspeções de 2009, 2010 e 2012 foram apenas recolhidas amostras de água da albufeira. Na Figura 5.16 apresenta-se um gráfico com os valores médios do TSD estimados para as amostras de água da albufeira, verificando-se que os valores estão compreendidos entre 10 e 30 mg/l.



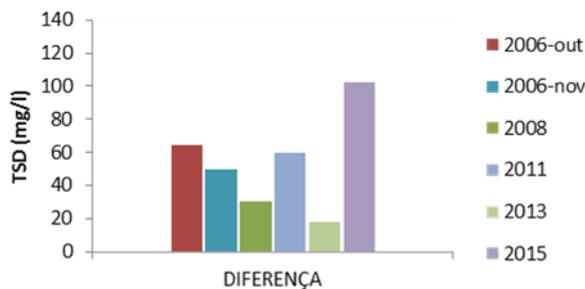
**Figura 5.16 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises da água da albufeira em 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2015**

Na Figura 5.17 apresentam-se os valores médios do TSD estimados para as amostras de água recolhidas nas bicas. Os valores variam entre 40 e 140 mg/l, pelo que aumentou significativamente a mineralização da água na sua passagem através do corpo da obra.



**Figura 5.17 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas das bicas, em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015**

Na Figura 5.18 representa-se a diferença do TSD da água coletada nas bicas e da água da albufeira, sendo que em média são dissolvidos cerca de 54 mg/l.



**Figura 5.18 - Barragem do Covão do Ferro. Valores da diferença do TSD da água coletada nas bicas e da água da albufeira, em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015**

**Quadro 5.6 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios do TSD estimados a partir dos resultados das análises das águas recolhidas nas inspeções realizadas entre 2006 e 2015**

TSD das águas da albufeira (mg/l)	TSD das águas dos drenos da máscara e das bicas (mg/l)	Diferença (mg/l)
19,25	73,38	54,13

O pH da água da albufeira, com valores sempre próximos de 7, não potencia uma dissolução de sais tão elevada como nas barragens de Guilhofrei ou Andorinhas.

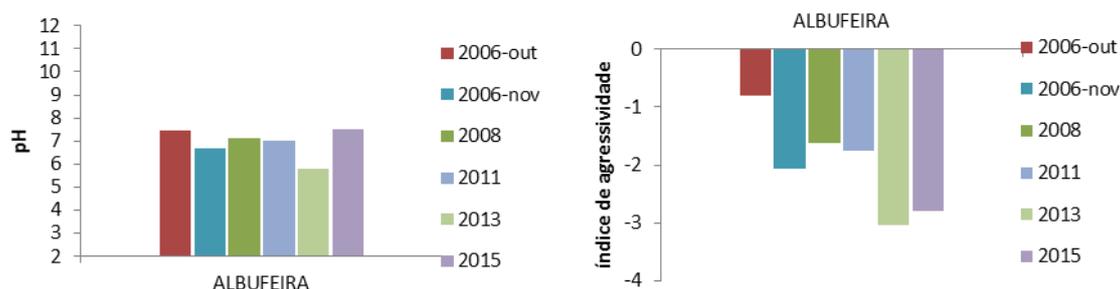


Figura 5.19 - Barragem do Covão do Ferro. Valores médios de pH e do índice de agressividade da água da albufeira em 2006, 2008, 2011, 2013 e 2015

A água repassada através da barragem, após 2006, é cerca de 70 litros/min (ver capítulo 4), que corresponde a cerca de 36.800.000 litros/ano. A massa dissolvida da obra, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação causadas apenas pela passagem de água pelo corpo da barragem, é cerca de 1.990 kg/ano, pelo que a quantidade de material dissolvido em cada ano pelo efeito da lixiviação das argamassas corresponde a 0,00075% da massa total da barragem, sendo de cerca de 18 g/m<sup>3</sup>.

### 5.3 Análise sucinta dos resultados

No Quadro 5.7 apresenta-se uma síntese dos valores estimados para a massa dissolvida por unidade de volume, para as quatro barragens portuguesas em estudo.

Quadro 5.7 - Valores estimados de massa dissolvida por efeito da lixiviação das argamassa de ligação devido apenas ao caudal repassado pelo corpo das obras

Barragem	Ano de construção/grande reabilitação	Período de análise	Massa dissolvida (valores médios em g/m <sup>3</sup> /ano)
Guilhofrei	1938	2004 a 2013	1
Andorinhas	1945	2004 a 2016	15
Freigil	1955	2005 a 2015	200
Covão do Ferro	1956	1987 a 1993	190
	2006	2006 a 2015	20

Os valores variam entre cerca de 1 g/m<sup>3</sup>, para a barragem de Guilhofrei, que está em muito bom estado de conservação, e 200 g/m<sup>3</sup>, para a barragem de Freigil, que parece ser o caso em que tem havido maior degradação. Entre estes dois valores existe uma razão de cerca de 200.

## **6. Interpretação dos deslocamentos observados ao longo do tempo nas barragens de alvenaria**

### **6.1 Considerações gerais**

#### **6.1.1 Modelos estruturais considerados**

Para interpretar o comportamento estrutural das quatro barragens, designadamente no que toca aos deslocamentos observados, utilizaram-se os modelos planos, criados no programa FLAC 7.0, anteriormente usados na análise da percolação através do corpo das obras.

Nos modelos estruturais foram consideradas zonas com propriedades distintas, correspondentes ao maciço rochoso de fundação e, no corpo da barragem, às alvenarias e aos trechos de betão. A consideração do maciço rochoso de fundação nos modelos destina-se, em exclusivo, à simulação do apoio elástico das estruturas. Em todos os modelos foi considerada uma fundação rochosa com um módulo de elasticidade médio de 20 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2. O módulo de elasticidade médio da alvenaria foi ajustado tendo em consideração a parcela do deslocamento observado atribuída aos efeitos do impulso da pressão hidrostática sobre o paramento de montante das obras, para o nível da albufera à cota do coroamento. Considerou-se, em todos os casos, um coeficiente de Poisson das alvenarias de 0,2.

#### **6.1.2 Notas sobre a observação de deslocamentos por métodos geodésicos**

A observação de deslocamentos nas quatro barragens tem sido efetuada por métodos geodésicos, tendo periodicidade anual as campanhas de medição. Na maior parte das obras estas campanhas são realizadas pelo dono de obra (EDP) e pelo LNEC, num esquema de repartição de tarefas previamente definido. Em cada obra foram selecionados os resultados da observação de alvos geodésicos que se consideraram serem os mais significativos para a caracterização do comportamento estrutural das barragens.

Os sistemas de observação geodésica são constituídos, em regra, por componentes distintas para a planimetria e para a altimetria. As marcas superficiais para observação de deslocamentos horizontais por triangulação geodésica são colocadas, em geral, no paramento de jusante, salvo algumas exceções, em que a topografia local obriga a que sejam colocadas no paramento de montante (como é o caso das barragens de Freigil e do Covão do Ferro). As marcas de referência são instaladas em pilares solidarizados ao maciço de fundação, nas encostas a jusante ou a montante. Embora isso não aconteça nas barragens em estudo, os deslocamentos horizontais podem também ser determinados por poligonização geodésica, usando bases de poligonais definidas nas galerias (INAG, 2001).

A determinação dos deslocamentos horizontais dos pontos objeto baseia-se na medição dos ângulos azimutais e distâncias definidos pelas estações, pelas referências e pelos pontos objeto. Os deslocamentos são referidos a um referencial ortonormado local, horizontal, com o eixo das ordenadas (yy) paralelo ao trecho central do eixo da barragem, e com sentido positivo dirigido

para montante, sendo o sentido positivo do eixo das abcissas (xx) dirigido da margem direita para a margem esquerda.

Os deslocamentos verticais são medidos através de nivelamento de precisão, em pontos localizados nas galerias e ao longo do coroamento (INAG, 2001). Nestes deslocamentos usa-se a convenção de considerar deslocamentos positivos quando se está na presença de empolamentos e deslocamentos negativos quando há assentamentos.

## 6.2 Método de interpretação dos deslocamentos observados

### 6.2.1 Aspetos gerais

Os deslocamentos das barragens de betão e de alvenaria são devidos, essencialmente, aos efeitos das pressões da água (pressão hidrostática e subpressões), das variações térmicas anuais (no ar e na água) e aos efeitos do tempo.

Os efeitos da água são, em regra, predominantemente influenciados pela pressão hidrostática, já que as variações observadas nas subpressões são normalmente pouco significativas.

Os efeitos térmicos estão diretamente relacionados com a sazonalidade das variações térmicas do ar e da água, sendo a resposta estrutural influenciada pela inércia térmica das obras.

Os efeitos do tempo podem ser relacionados com fenómenos intrínsecos do comportamento dos materiais (por exemplo, a fluência) ou por patologias dos próprios materiais ou das estruturas que provocam deterioração ou envelhecimento.

Em engenharia de barragens é usual utilizar-se o método de interpretação quantitativa como técnica para avaliar a contribuição de cada um dos três efeitos acima referidos, no que diz respeito à interpretação do comportamento das obras.

### 6.2.2 Generalidades sobre os métodos de interpretação quantitativa

A individualização dos efeitos observados devidos às principais ações na resposta observada das estruturas pode ser realizada utilizando técnicas de interpretação quantitativa, as quais se baseiam em relações semi-empíricas entre os efeitos observados e as principais solicitações. Neste tipo de abordagem assumem-se, em regra, as seguintes hipóteses (Gomes, 1981):

- i. O comportamento da barragem, para as ações da água e para as variações sazonais de temperatura, é reversível.
- ii. Todos os efeitos não reversíveis são função da variável do tempo.
- iii. Os valores observados são a soma das parcelas reversível e não reversível.

Para uma época de observação  $j$  considera-se uma expressão genérica do tipo,

$$d_j(h, t', t) = d_h(h_j) + d_T(t'_j) + d_t(t_j) + k_0 + r_j \quad (6.1)$$

onde  $d_j(h, t', t)$  representa a resposta observada na época  $j$ , sendo que  $d_h$  é a resposta da estrutura para a pressão hidrostática,  $d_T$  a resposta para as variações de temperatura,  $d_t$  o efeito do tempo,  $k_0$  uma constante que depende do valor dos efeitos  $d_h$ ,  $d_T$  e  $d_t$  na época inicial, e  $r_j$  é o resíduo relativo à diferença entre o valor observado e o valor calculado.

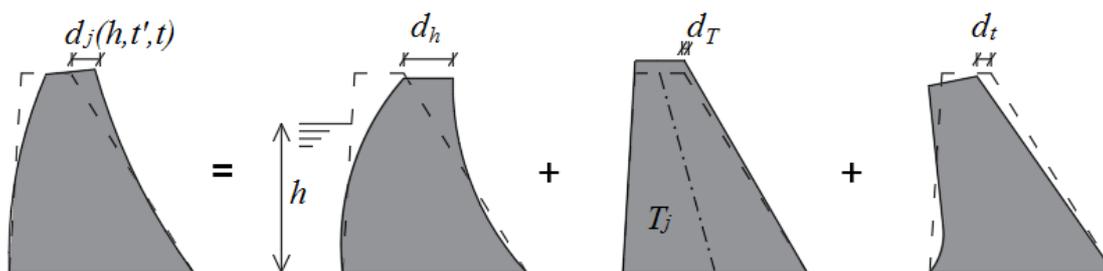


Figura 6.1 - Representação das três parcelas dos deslocamentos observados

Para representar os deslocamentos devido à pressão hidrostática,  $d_h(h)$ , é usual considerar para uma função polinomial,

$$d_h(h) = \sum_{i=1}^n a_i h^i \quad (6.2)$$

em que  $h$  é a diferença entre os níveis da água a montante e a jusante e  $n$  corresponde ao grau do polinômio relativo ao efeito desta variação, sendo em regra considerado do quarto grau. Muitas vezes, quando existem poucos elementos de observação, considera-se apenas o termo do quarto grau,

$$d_h(h) = a_4 h^4 \quad (6.3)$$

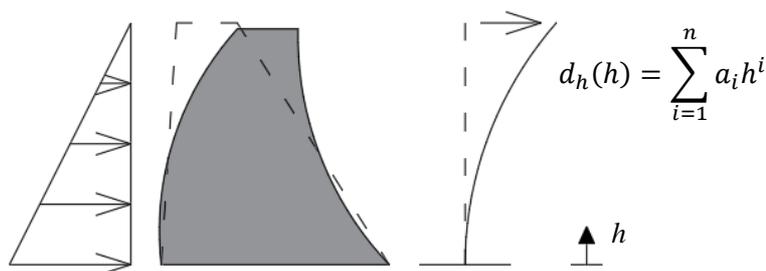


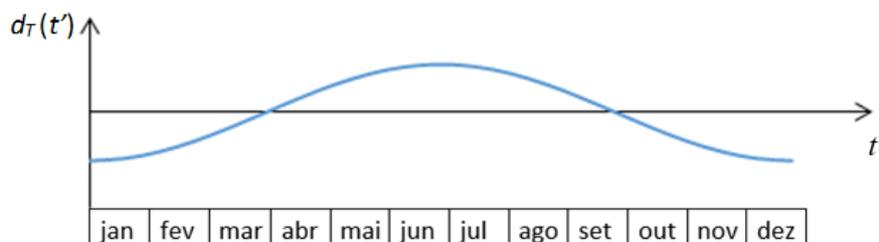
Figura 6.2 - Representação da deformada de uma barragem devido ao efeito da pressão hidrostática

Os deslocamentos devido às variações térmicas anuais,  $d_T(t')$ , são representados por uma função sinusoidal de período anual,

$$d_T(t') = b_1 \cos \frac{2\pi}{365} t' + b_2 \sin \frac{2\pi}{365} t' \quad (6.4)$$

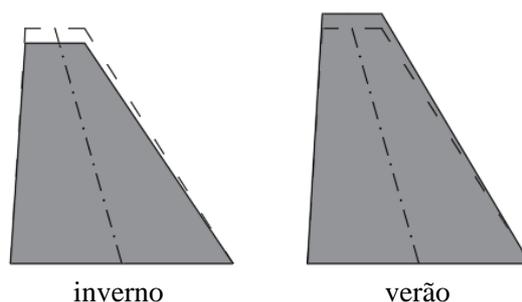
onde  $t'$  é o tempo (em dias) contado desde o início do ano corrente. Esta função pode ser escrita na forma,

$$d_T(t') = b \cos \left( \frac{2\pi}{365} t' - \phi \right) \quad (6.5)$$



**Figura 6.3 - Representação gráfica da variação dos deslocamentos em função da temperatura ao longo do ano**

Na Figura 6.4 apresenta-se a interpretação física dos deslocamentos de uma barragem gravidade devidos ao efeito das variações anuais de temperatura, em épocas de inverno e de verão.



**Figura 6.4 – Interpretação física dos deslocamentos de uma barragem gravidade devidos ao efeito das variações anuais de temperatura, no inverno e nos verão**

Nas estruturas de média dimensão, como é o caso das barragens em estudo, existe um desfasamento de cerca de um mês entre os valores extremos das temperaturas do ar e da água e os valores extremos dos deslocamentos observados.

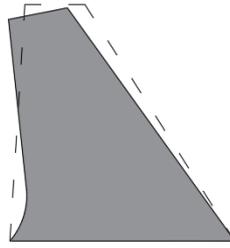
Nas barragens de alvenaria não existe fluência. Assim, para representação dos deslocamentos devidos aos efeitos do tempo,  $d_t(t)$ , que incluem os efeitos de deterioração das obras ao longo do tempo  $t$  devida à lixiviação das argamassas de ligação, foram considerados polinómios genéricos do tipo,

$$d_t(t) = \sum_{i=1}^n c_i t^i \quad (6.6)$$

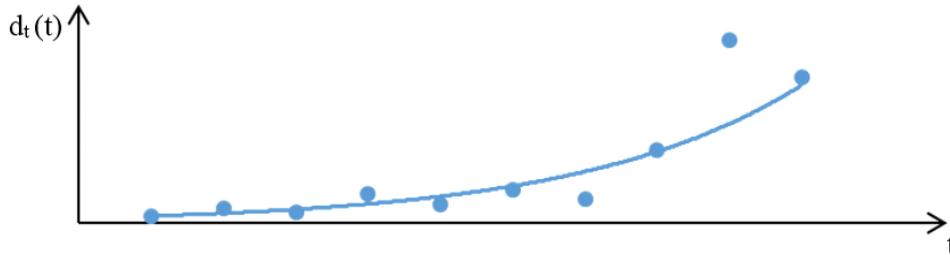
onde  $t$  é o tempo, em anos, contabilizado desde o início do processo em análise. No caso das barragens em estudo, dado não existirem muitos elementos de observação, consideraram-se polinómios do segundo grau, com a forma,

$$d_t(t) = c_1 t + c_2 t^2 \quad (6.7)$$

Na Figura 6.5 apresenta-se a interpretação física dos deslocamentos de uma barragem gravidade de alvenaria, devidos aos efeitos do tempo associados à deterioração estrutural das alvenarias do seu corpo por lixiviação das argamassas de ligação.



**Figura 6.5 - Representação da deformada de uma barragem devida aos efeitos do tempo associadas à degradação das alvenarias do seu corpo por lixiviação das argamassas de ligação**



**Figura 6.6 - Representação gráfica da evolução dos deslocamentos ao longo do tempo**

Considerando as funções definidas, o deslocamento total de um ponto das barragens em estudo é dado pela soma dos deslocamentos devidos aos três diferentes efeitos, havendo a ajustar os valores de seis variáveis para caracterizar a função deslocamento,

$$d_i(h, t', t) = a_4 h^4 + b \cos\left(\frac{2\pi}{365} t' - \phi\right) + c_1 t + c_2 t^2 + K_o + r_j \quad (6.8)$$

### 6.2.3 Ação correspondente à lixiviação das argamassas de ligação

Depois de ajustar o valor do módulo de elasticidade médio das alvenarias da barragem considerando o modelo estrutural e a parcela do deslocamento horizontal devida à pressão hidrostática, o modelo estrutural é usado para simular os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação, considerando os resultados obtidos no capítulo 5.

Considerando a massa total dissolvida num dado período de tempo e admitindo que a dissolução de sais é proporcional à velocidade (caudal por unidade de superfície), estabeleceu-se uma formulação para a determinação das extensões correspondentes à perda de massa por lixiviação das argamassas.

Assim, considerando um período de  $n$  anos, sendo  $m_a$  a massa total lixiviada anualmente e  $m_T$  a massa total da barragem, a extensão volumétrica média no corpo da barragem,  $\epsilon_{v,med}$ , devida à perda de massa pode ser calculada pela expressão,

$$\epsilon_{v,med} = \frac{m_a * n}{m_T} \quad (6.9)$$

Admitindo que o processo é isotrópico, em cada direção a extensão média,  $\epsilon_{ii,med}$ , será dada por,

$$\epsilon_{ii,med} = \frac{\epsilon_{v,med}}{3}, \quad i = 1,2,3 \quad (6.10)$$

Em cada elemento  $j$  (com área  $A_j$  e velocidade de escoamento  $v_j$ ) considerado na discretização plana do perfil, as extensões  $\epsilon_{ii}(j)$  são dadas por,

$$\varepsilon_{ii}(j) = v_j \frac{\sum_{n=1}^M A_n}{\sum_{k=1}^M v_k A_k} \varepsilon_{ii,med}, \quad i = 1,2,3 \quad (6.11)$$

sendo  $M$  o número de elementos da discretização do domínio.

Muitos programas de análise estrutural, entre os quais se inclui o FLAC, não permitem a consideração direta de deformações impostas, mas permitem considerar variações de temperatura. Assim, usou-se o artifício habitual de converter as deformações em temperaturas equivalentes,  $\Delta T(j) = \varepsilon_{ii}(j)/\alpha$  (considerou-se um coeficiente de dilatação térmica linear  $\alpha = 10^{-5} / ^\circ C$ ).

Considerando as expressões anteriores, desenvolveu-se um algoritmo de cálculo para a obtenção das variações de temperatura (negativas) em cada ponto dos perfis analisados, em função da velocidade de escoamento em cada zona da malha.

## 6.3 Barragem de Guilhofrei

### 6.3.1 Monitorização de deslocamentos

O sistema de observação geodésica, para determinação dos deslocamentos horizontais e verticais da barragem de Guilhofrei, é constituído, respetivamente, por uma rede de triangulação a jusante e por duas linhas de nivelamento.

O sistema de medição de deslocamentos horizontais inclui um conjunto de oito pontos objeto no paramento de jusante, cinco aproximadamente à cota 335,0 m e três aproximadamente à cota 326,0 m (LNEC, 2016b), com apoio em três pilares de estacionamento e sete referências. Todos os pontos objeto são intersetados pelas visadas dos três pilares. Na Figura 6.7 representam-se o sistema planimétrico e as pontarias para três dos oito pontos objeto (LNEC, 2013).

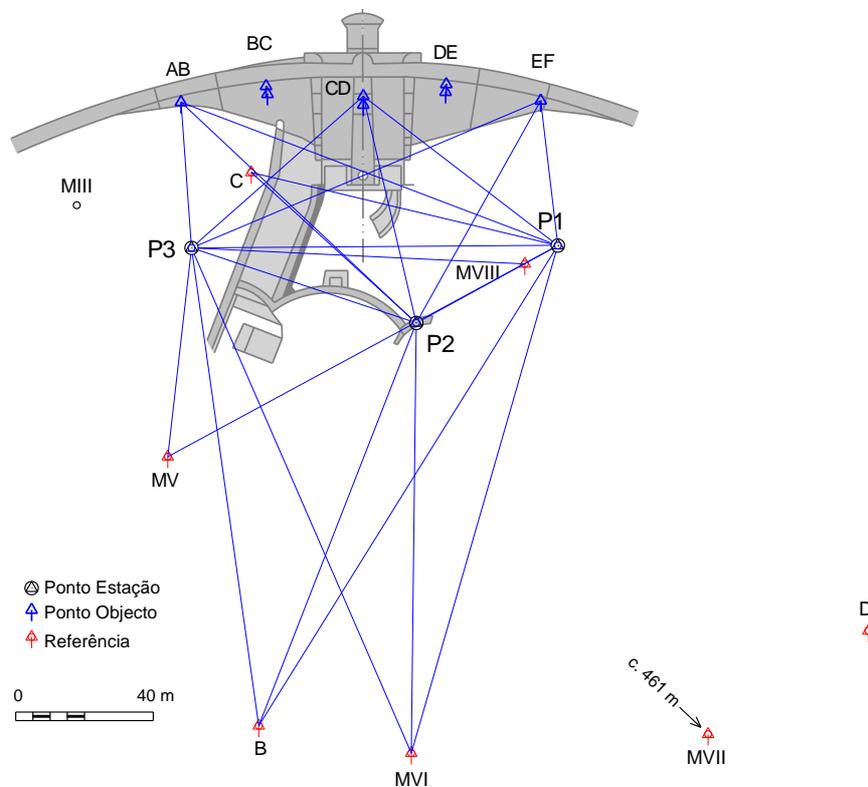


Figura 6.7 - Barragem de Guilhofrei. Esquema de rede de triangulação (LNEC, 2013)

O sistema de medição dos deslocamentos verticais é constituído por duas linhas de nivelamento geométrico de precisão (LNG), uma instalada no coroamento da barragem (Figura 6.8) e outra na galeria geral de drenagem (LNEC, 2016b). No coroamento da barragem está materializada uma LNG constituída por 15 pontos: duas referências (NFD e NFE1), uma em cada margem, cada uma das quais com uma testemunha (NFD1 e NFE), seis pontos objeto e cinco pontos auxiliares (ou de passagem). Na galeria está também materializada uma LNG, apoiada num ponto de referência (RI) exterior e numa testemunha (RII). Para ligar as referências aos três pontos objeto é necessário recorrer a três pontos de passagem (TG1, TG2 e TG3) para vencer a distância e o desnível entre os pontos (LNEC, 2013).

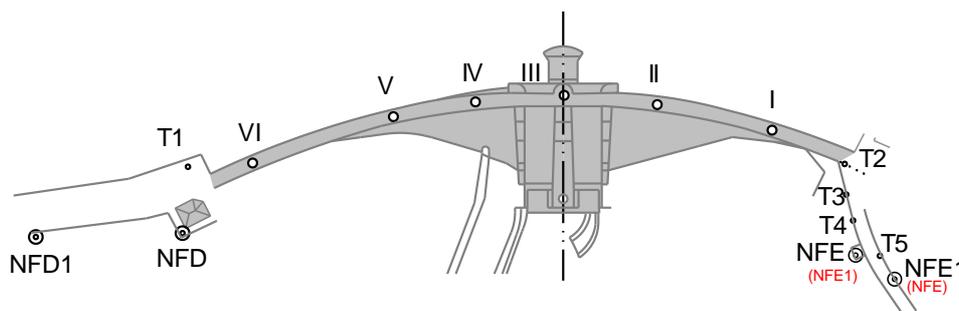


Figura 6.8 - Barragem de Guilhofrei. Esquema e localização aproximada dos pontos da LNG do coroamento (LNEC, 2013)

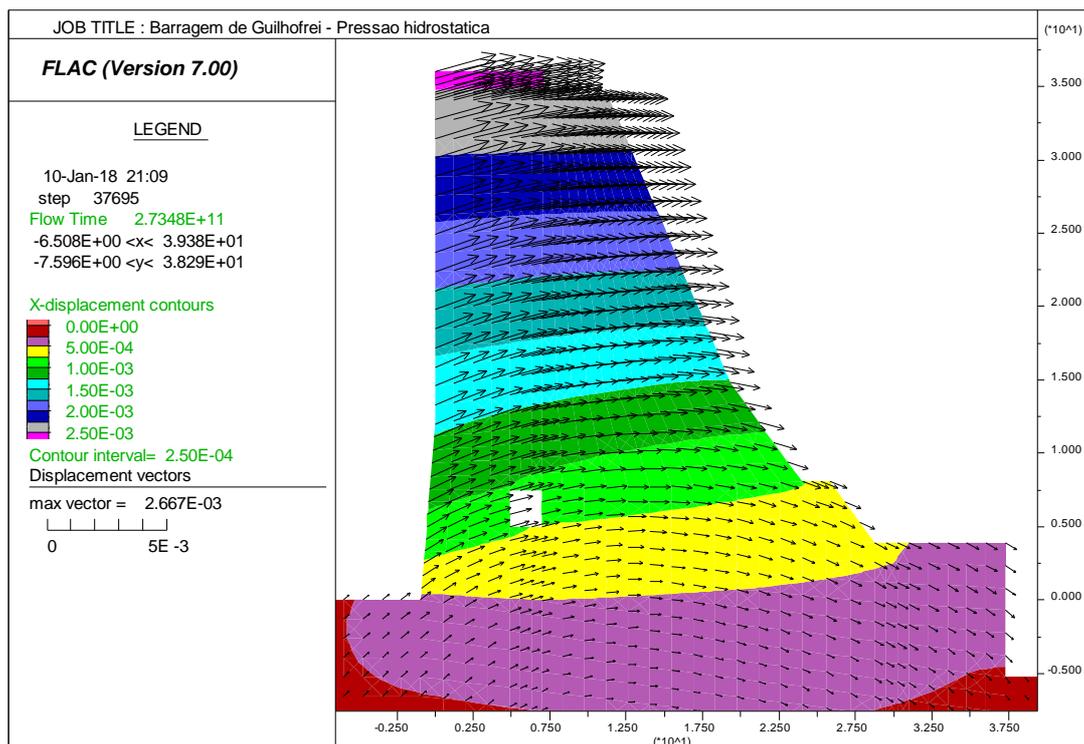
Foram considerados para o estudo os deslocamentos observados nos blocos BC, CD e DE, designadamente os deslocamentos horizontais alvos à cota 335 m e os deslocamentos verticais dos pontos II, III e IV. No Anexo II apresentam-se os resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos observados entre 1974 e 2015.

### 6.3.2 Resultados do modelo numérico

O modelo numérico plano diz respeito a uma secção pelo contraforte central, considerando o nível da albufeira à cota do coroamento. Uma vez que os deslocamentos da barragem de Guilhofrei são muito pequenos, determinou-se o seu módulo de elasticidade médio tendo em consideração o valor do deslocamento horizontal do perfil com maior sensibilidade ao impulso da pressão hidrostática, sendo de 2,4 mm para jusante, à cota de 335,0 m. Com este deslocamento estimou-se para módulo de elasticidade da barragem o valor de 17,0 GPa (Figura 6.9), que pareceu ser ajustado ao bom estado de conservação da obra. Para comparação de deslocamentos verticais, considerou-se como valor observado a média dos valores calculados na interpretação quantitativa para os pontos II, III e IV da linha de nivelamento.

Quadro 6.1 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Guilhofrei devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento)

Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
Observado	Estimado	Observado	Estimado
-2,4	-2,4	-1,3	0,5



**Figura 6.9 - Barragem de Guilhofrei. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0**

Pode notar-se, desde já, que são substancialmente diferentes, e de sentido oposto, os deslocamentos verticais obtidos com o modelo estrutural e na interpretação quantitativa dos deslocamentos observados devidos à pressão hidrostática (Quadro 6.1).

O cálculo dos efeitos da lixiviação das argamassas de ligação foi feito considerando apenas os resultados obtidos em campanhas de observação posteriores a 1997. Esta opção deve-se ao facto de os valores observados até esta data serem muito escassos e com um grande espaçamento temporal entre eles (Figura II.4 a Figura II.6). Na Figura 6.10 apresentam-se os principais dados e resultados da análise estrutural.

No coroamento, os deslocamentos radiais calculados com o modelo são para montante, com cerca de 0,13 mm, ao passo que os deslocamentos verticais são para baixo, com valor de 0,12 mm. Para os efeitos observados atribuídos ao tempo, os deslocamentos radiais são também para montante, mas de 3,1 mm, sendo os deslocamentos verticais de assentamento, de 0,6 mm (Quadro 6.2). Assim, a parcela do tempo nos deslocamentos observados tem o mesmo sinal dos deslocamentos estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas, embora a magnitude seja muito diferente.

**Quadro 6.2 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Guilhofrei. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias**

Período	Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado
1997 - 2015	3,1	0,13	-0,6	-0,12

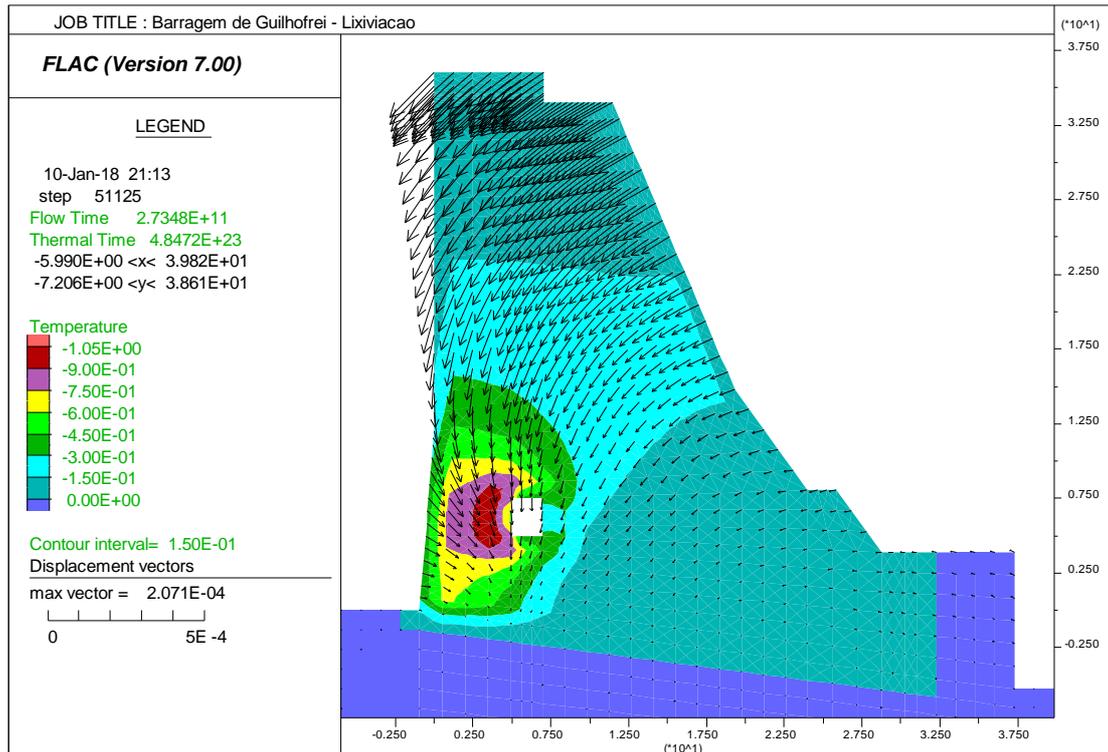


Figura 6.10 - Barragem de Guilhofrei. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0

## 6.4 Barragem de Andorinhas

### 6.4.1 Monitorização de deslocamentos

A barragem de Andorinhas tem um sistema de observação geodésica para determinação dos deslocamentos horizontais e verticais da barragem, que é constituído, respetivamente, por uma rede de triangulação e por uma linha de nivelamento (LNEC, 2016a).

A rede de triangulação é formada por: duas estações materializadas por pilares em boa fundação e centragem forçada do tipo “Wild”, situados a jusante da barragem; quatro pontos de referência, materializados por alvos de pontaria ótica, embutidos em rocha firme, dois em cada margem da barragem; e três pontos objeto materializados por alvos de pontaria ótica, cravados nos muros laterais do descarregador e no contraforte central (M1, M2 e M3).

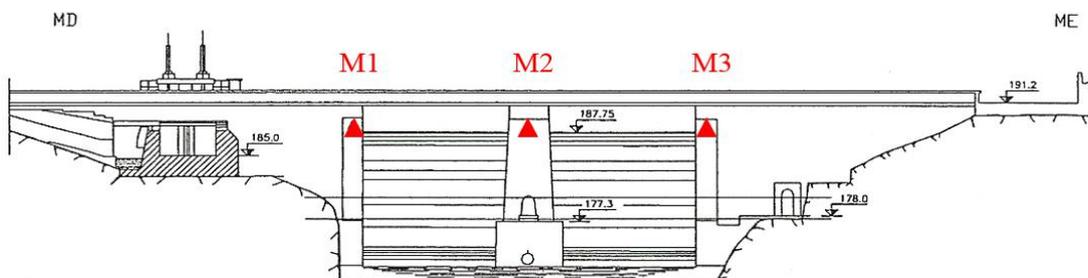


Figura 6.11 - Barragem de Andorinhas. Rede planimétrica (por jusante): 3 alvos de pontaria ótica, embutidos nos muros laterais do descarregador e no contraforte central (M1, M2 e M3)

A linha de nivelamento geométrico de precisão, instalada no coroamento da barragem, é constituída por dois pontos de referência, três pontos objeto (N1, N2 e N3) e três pontos de passagem materializados por tacos de aço inox (EDP, 2015).

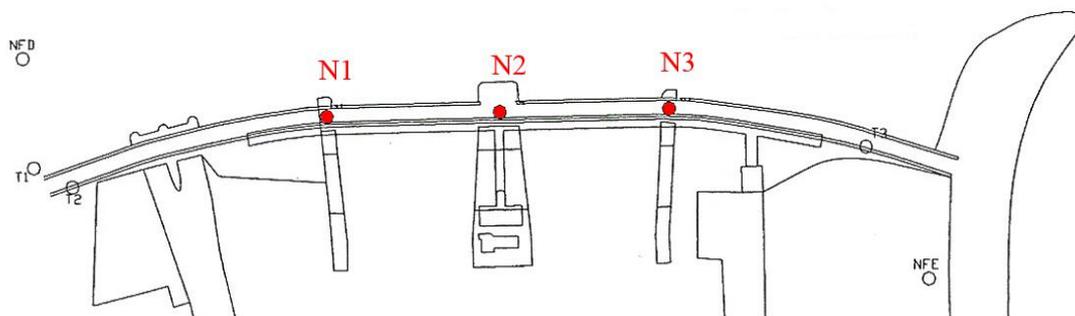


Figura 6.12 - Barragem de Andorinhas. Rede altimétrica: 3 marcas de nivelamento situadas no coroamento, nas zonas dos contrafortes

Na análise foram considerados os resultados da observação obtidos em todos os alvos de pontaria ótica e pontos objeto existentes na barragem.

#### 6.4.2 Resultados do modelo numérico

Considerando para a pressão hidrostática um deslocamento horizontal para jusante de 2 mm do contraforte central, à cota 188,5 m (valor médio dos deslocamentos dos pontos M1 e M3, uma vez que o deslocamento do M2 não foi considerado, já que apresenta valores aparentemente incoerentes com o efeito em questão), estimou-se um valor médio de módulo de elasticidade da barragem de 7,0 GPa (Figura 6.13). Na comparação de resultados considerou-se para o deslocamento vertical o valor médio dos valores calculados na interpretação quantitativa para os três pontos da linha de nivelamento.

Quadro 6.3 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Andorinhas devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento)

Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
Observado	Estimado	Observado	Estimado
-2,0	-2,0	-0,8	0,5

À semelhança do que aconteceu na barragem de Guilhofrei, volta a notar-se que são de sentido oposto os deslocamentos verticais obtidos com o modelo estrutural e na interpretação quantitativa dos deslocamentos observados devidos à pressão hidrostática (Quadro 6.3).

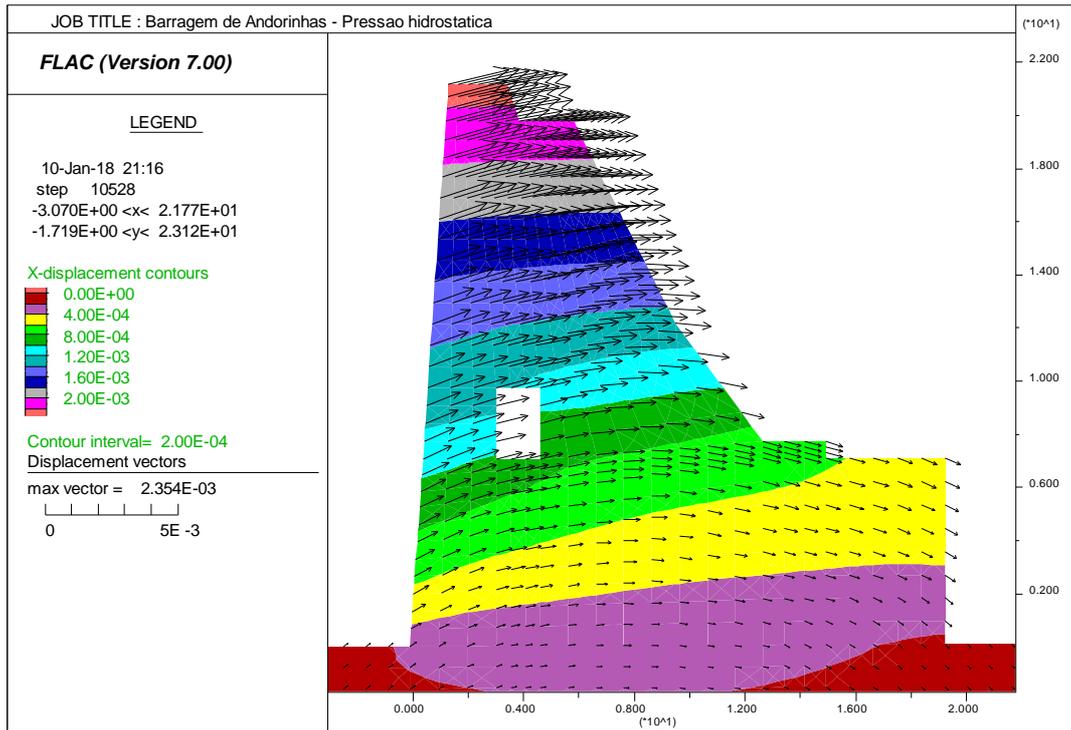


Figura 6.13 - Barragem de Andorinhas. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0

O cálculo dos efeitos da lixiviação das argamassas de ligação foi feito para o período posterior a 1998. Na Figura 6.14 apresentam-se os principais dados e resultados da análise estrutural.

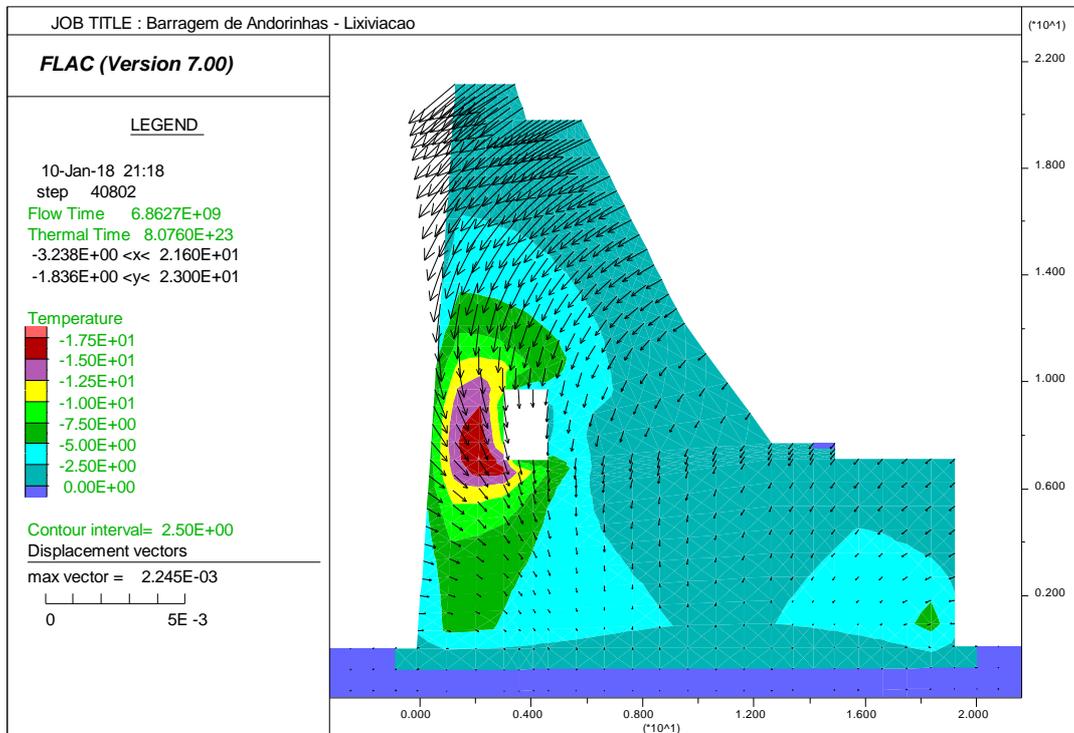


Figura 6.14 - Barragem de Andorinhas. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0

No coroamento, os deslocamentos radiais calculados com o modelo são para montante, com cerca de 1,3 mm, ao passo que os deslocamentos verticais são para baixo, com valor de 1,3 mm. Para os efeitos observados atribuídos ao tempo, os deslocamentos radiais médios são também para montante, de 2,0 mm, sendo os deslocamentos verticais de empolamento, de 0,9 mm (Quadro 6.4). Assim, a parcela do tempo nos deslocamentos observados ajusta razoavelmente bem com deslocamentos estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, mas tem sinais contrários na componente vertical.

**Quadro 6.4 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Andorinhas. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias**

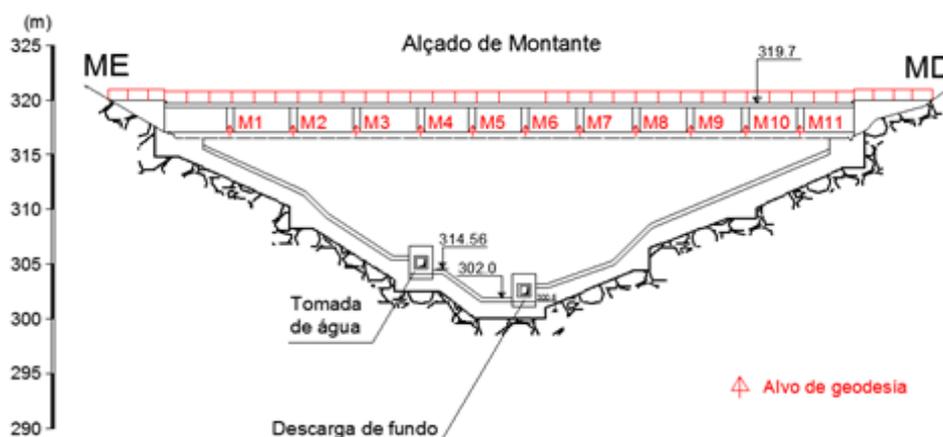
Período	Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado
1998 – 2015	2,0	1,3	0,9	-1,3

## 6.5 Barragem de Freigil

### 6.5.1 Monitorização de deslocamentos

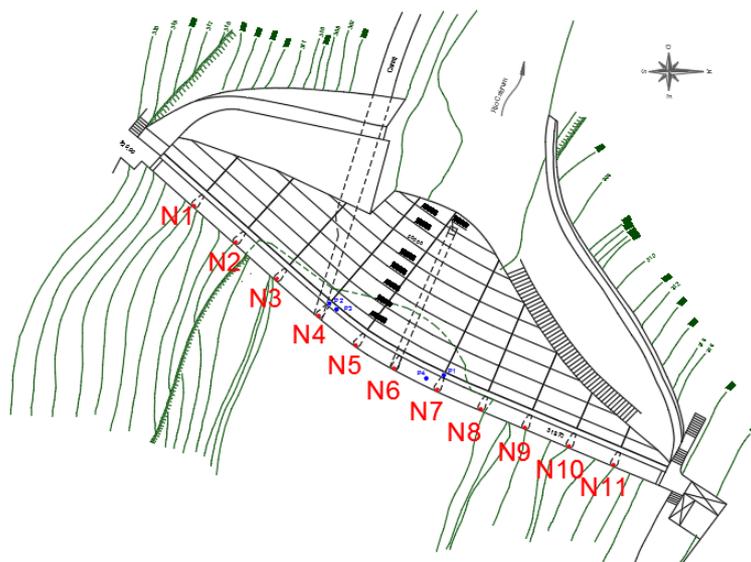
O sistema de observação geodésica da barragem de Freigil, para a determinação dos deslocamentos, consiste numa rede de triangulação e numa linha de nivelamento.

Os deslocamentos planimétricos obtêm-se por meio de uma rede de triangulação formada por: três estações materializadas por pilares e centragem forçada, estando duas situadas na margem direita (PD1 e PD2) e a outra na margem esquerda (PE1), a montante da barragem e fundadas em rocha firme; cinco pontos de referência, materializados por alvos de pontaria ótica do tipo olho de boi, em maciços rochosos, dois na margem esquerda e dois na margem direita, devidamente orientados para as estações; e onze pontos objeto (M1 a M11) materializados por alvos de pontaria ótica do tipo olho de boi e embutidos na face de montante de cada um dos pilares do passadiço da barragem, à cota de 319 m.



**Figura 6.15 - Barragem de Freigil. Rede planimétrica (por montante): 11 alvos nos pilares de suporte do passadiço do coroamento, acima da crista do descarregador**

Os deslocamentos verticais são medidos através de uma linha de nivelamento implantada junto ao passadiço do coroamento, por: onze pontos objeto (N1 a N11) situados na face de montante de cada um dos pilares do passadiço (aproximadamente 1,5 m acima da crista do descarregador); três pontos de passagem, dois na margem esquerda (N0 e NF2) e um na margem direita (N12); um ponto de referência (NF1) embutido em rocha firme e localizado na margem esquerda (EDP, 2012).



**Figura 6.16 - Barragem de Freigil. Rede altimétrica: 11 marcas de nivelamento nos pilares de suporte do passadiço do coroamento, acima da crista do descarregador**

Na análise consideraram-se os deslocamentos radiais dos pontos M3, M5, M6 e M8, e os deslocamentos verticais dos pontos N3, N5, N6 e N8.

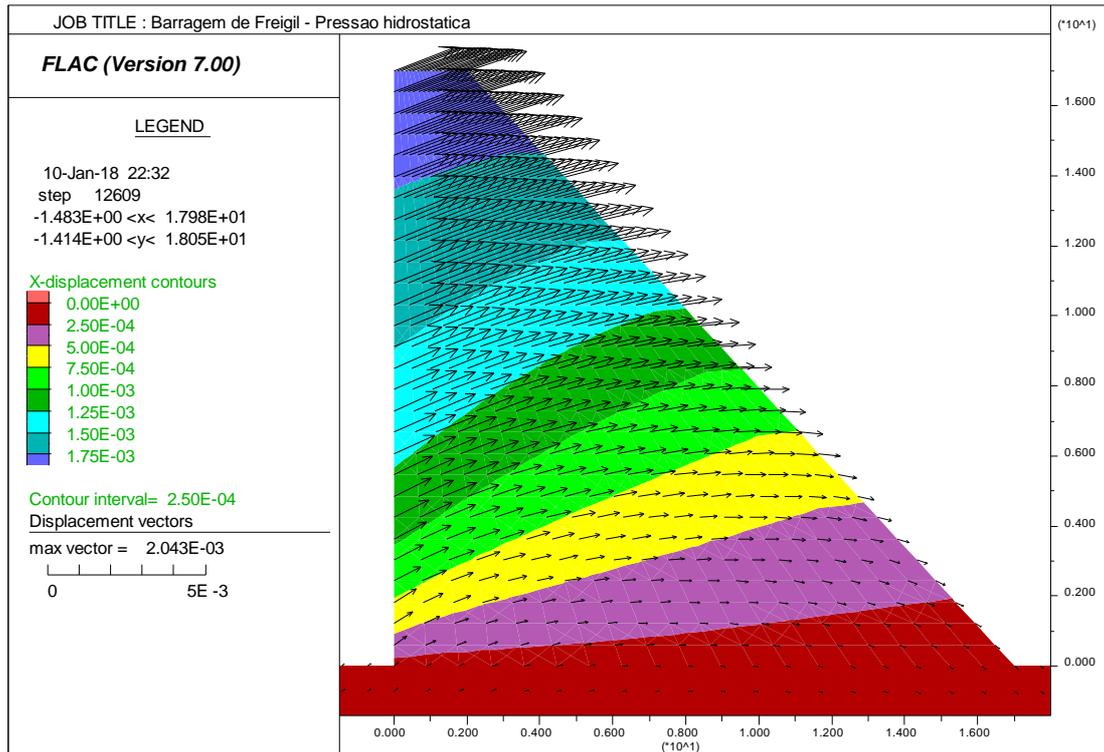
### 6.5.2 Resultados do modelo numérico

Considerando para a pressão hidrostática um deslocamento horizontal do coroamento, para jusante, de 1,88 mm na zona central da obra (média dos valores obtidos nos pontos M3, M5, M6 e M8, para a parcela da pressão hidrostática na interpretação quantitativa), estimou-se um valor médio de módulo de elasticidade da alvenaria da barragem de 2,5 GPa (considerou-se um valor de 20 GPa para módulo de elasticidade da camada de betão de revestimento do paramento de jusante). Os resultados são apresentados na Figura 6.17. Relativamente aos deslocamentos verticais, considerou-se, na comparação de resultados, como valor observado a média dos valores calculados na interpretação quantitativa para os quatro pontos N3, N5, N6 e N8 da linha de nivelamento.

**Quadro 6.5 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Freigil devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do NPA)**

Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
Observado	Estimado	Observado	Estimado
-1,88	-1,90	0,68	0,74

Pode notar-se, neste caso, uma muito boa concordância entre os deslocamentos verticais obtidos com o modelo estrutural e na interpretação quantitativa dos deslocamentos observados devidos à pressão hidrostática (Quadro 6.5).



**Figura 6.17 - Barragem de Freigil. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática, calculados através do programa FLAC 7.0**

O cálculo dos efeitos da lixiviação das argamassas de ligação foi feito para o período posterior a 1998. Na Figura 6.18 apresentam-se os principais dados e resultados da análise estrutural. No coroamento, os deslocamentos radiais calculados com o modelo são para montante, com cerca de 7,2 mm, ao passo que os deslocamentos verticais são para baixo, com valores de 11,4 mm. Para os efeitos observados atribuídos ao tempo, os deslocamentos radiais médios são também para montante, de 7,0 mm, sendo os deslocamentos verticais de assentamento, de 1,6 mm (Quadro 6.6). Assim, a parcela do tempo nos deslocamentos observados tem um ajuste razoável com deslocamentos estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas, na componente radial, mas na componente vertical os valores, embora sejam ambos de assentamento, têm magnitudes muito diferentes.

**Quadro 6.6 - Valores médios dos deslocamentos da barragem de Freigil. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias**

Período	Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado
1998 - 2016	7,0	7,2	-1,6	-11,4

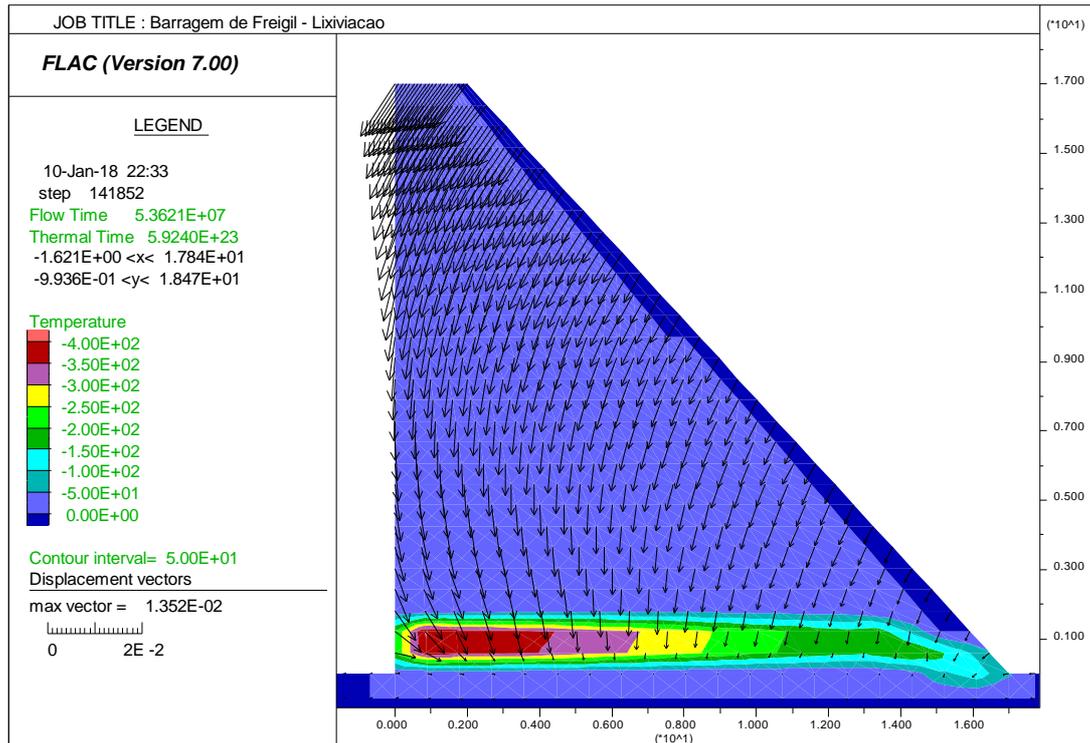


Figura 6.18 - Barragem de Freigil. Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC 7.0

## 6.6 Barragem do Covão do Ferro

### 6.6.1 Monitorização de deslocamentos

O sistema de observação geodésica da barragem do Covão do Ferro, para a determinação de deslocamentos horizontais e verticais da estrutura, é constituído, respetivamente, por uma rede de triangulação (Figura 6.19) e por uma linha de nivelamento (Figura 6.20).

A componente planimétrica do sistema de observação geodésica da barragem é constituída por uma rede de triangulação, a montante da barragem, cujos vértices são quatro pilares de estacionamento (PFD1, PFD2, PFE1 e PFE2) com peças de centragem forçada do tipo Kern e seis pontos objeto (PC1 a PC6) materializados por peças de centragem forçada do tipo Wild (pontos alvo), cravadas na guarda de montante do coroamento da barragem.

O sistema de medição dos deslocamentos verticais é constituído por uma linha de nivelamento geométrico de precisão, constituída por dez pontos objeto (MN0 a MN9) materializados por tacos de latão cravados no pavimento do coroamento, junto à guarda de montante, no interior de caixas de proteção adequadas. A linha é apoiada, na margem direita, em dois pontos de referência (NFD1 e NFD2) e, na margem esquerda, em três pontos de referência (NFE1, NFE2 e NFE3), todos considerados fixos. Existem ainda alguns pontos de passagem, na margem esquerda, para facilitar a ligação, em boas condições, do ponto objeto MN0 aos pontos de referência (LNEC, 2014).

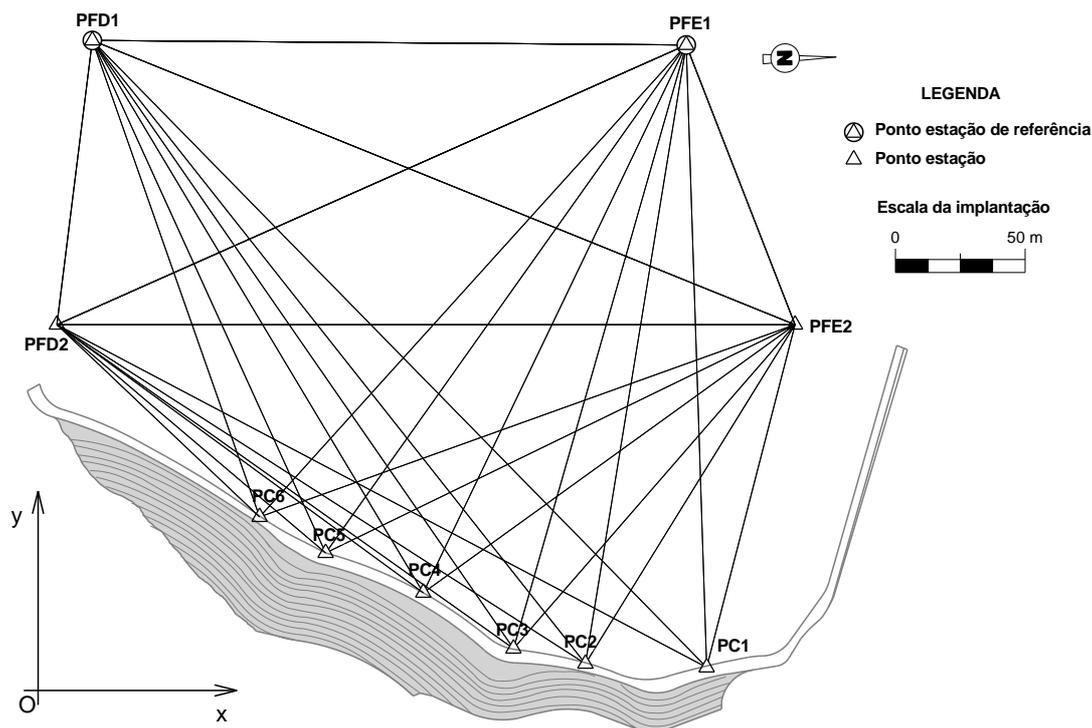


Figura 6.19 - Barragem do Covão do Ferro. Rede geodésica planimétrica

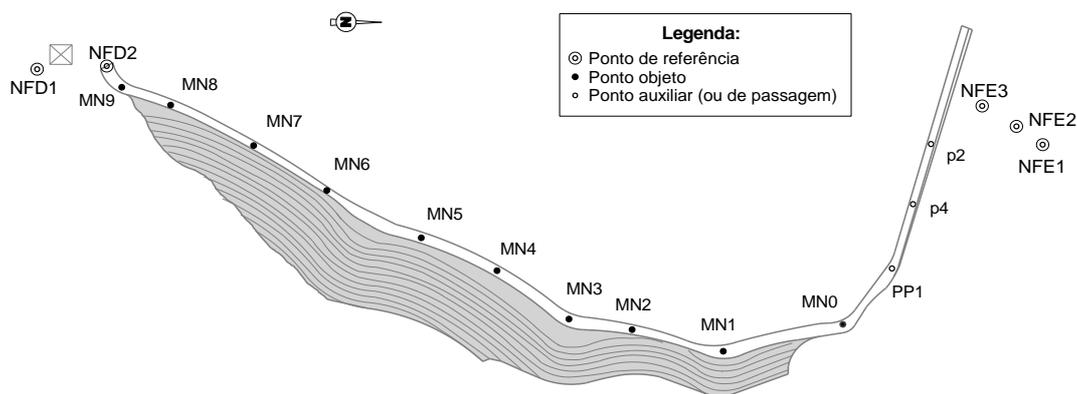


Figura 6.20 - Barragem do Covão do Ferro. Esquema e localização aproximada dos pontos da LNG do coroamento

Na análise consideraram-se os deslocamentos horizontais dos pontos PC4, PC5 e PC6, e os deslocamentos verticais dos pontos MN4, MN5 e MN6.

### 6.6.2 Resultados dos modelos numéricos

Consideraram-se a pressão hidrostática e a parcela dos deslocamentos horizontais do coroamento, para jusante, atribuídos a esta solicitação na interpretação quantitativa, na estimativa dos valores médios de módulo de elasticidade da alvenaria da barragem, para as secções 1 e 2 nos dois períodos em análise.

Para o período de 1987 a 1992, o modelo representativo da secção 1, tendo em conta o valor médio do deslocamento horizontal para jusante de 12 mm dos pontos CB6 e CB7 (pontos objeto do sistema de observação antigo, localizados junto ao PC5 e PC6, respetivamente), estimou-se um módulo de elasticidade das alvenarias de 1,3 GPa, e para o modelo da secção 2, tendo em conta o deslocamento horizontal para jusante de 11,6 mm do ponto objeto CB4/5 (junto ao PC4),

estimou-se um valor do módulo de elasticidade para as alvenarias de 3,0 GPa. O valor médio para as duas secções é de 2,2 GPa.

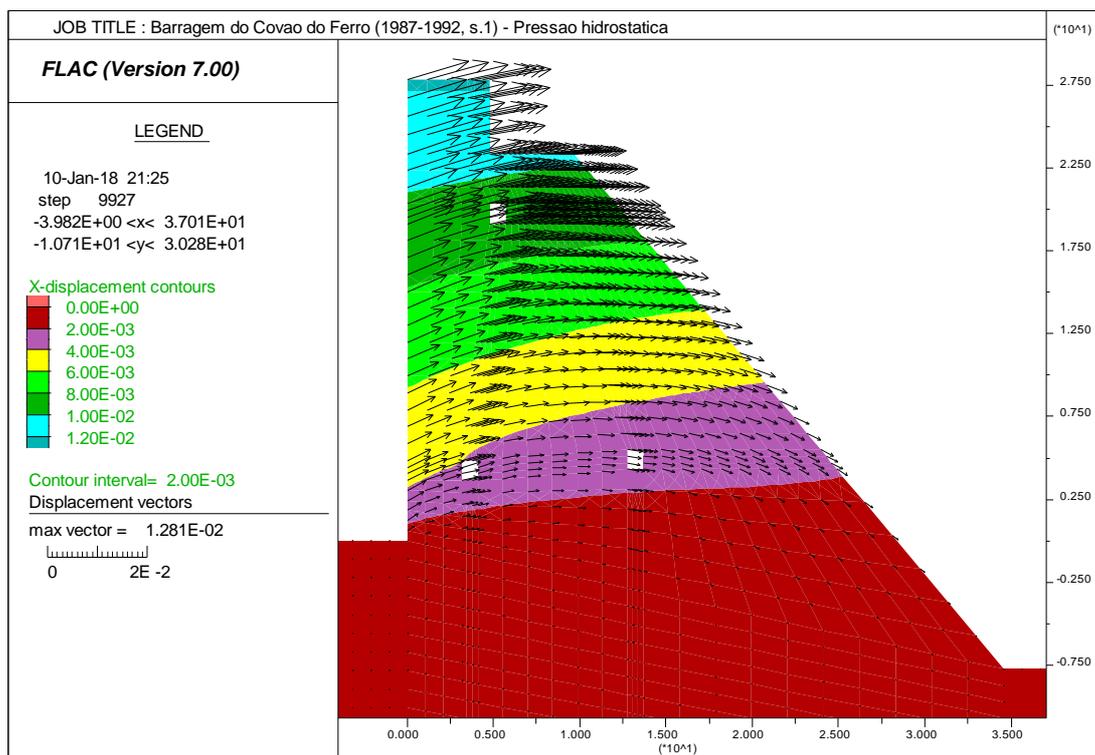
Para o período entre 2006 e 2017, tendo em conta os deslocamentos horizontais observados dos pontos objetos PC4 e PC5, estimou-se um módulo de elasticidade para a secção 1 de 1,5 GPa, e tendo em conta o deslocamento do PC6 foi estimado para a secção 2 um módulo de elasticidade de 3,1 GPa, sendo o valor médio de 2,3 GPa. Este conjunto de valores está em linha com os obtidos em estudos similares recentes (Fernandes, 2016).

Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 6.21 a 6.24.

Os deslocamentos verticais calculados numericamente são muito semelhantes aos observados (Quadro 6.7), podendo afirmar-se que o ajuste do modelo para estes deslocamentos é de boa qualidade.

**Quadro 6.7 - Valores médios dos deslocamentos da barragem do Covão do Ferro devidos ao efeito da pressão hidrostática no paramento de montante (água à cota do coroamento)**

Período	Perfil	Deslocamentos jusante-montante (mm)		Deslocamentos verticais (mm)		E (GPa)
		Observados	Estimados	Observados	Estimados	
1987-1992	Secção 1	-12,0	-12,0	2,2	2,5	2,2
	Secção 2	-11,6	-11,6	2,5	2,6	
2006-2017	Secção 1	-10,8	-10,8	1,2	2,2	2,3
	Secção 2	-11,1	-11,1	1,1	2,5	



**Figura 6.21 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 1987 e 1992). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 1, calculados através do programa FLAC 7.0.**

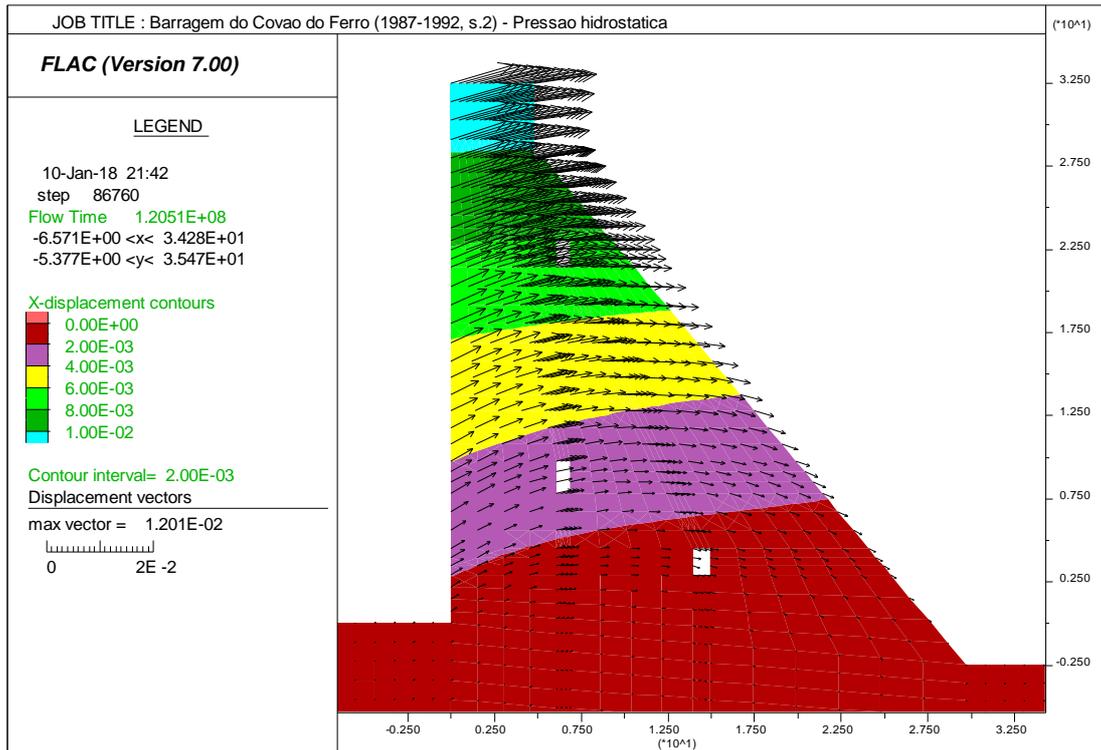


Figura 6.22 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 1987 e 1992). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 2, calculados através do programa FLAC 7.0.

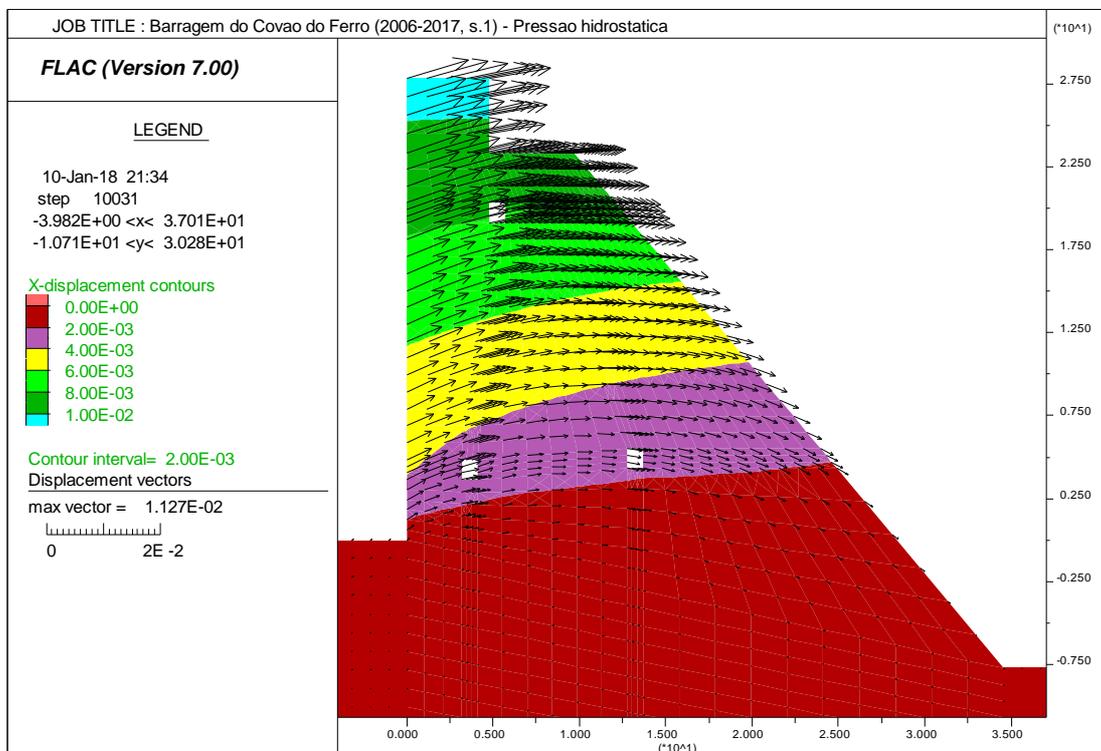
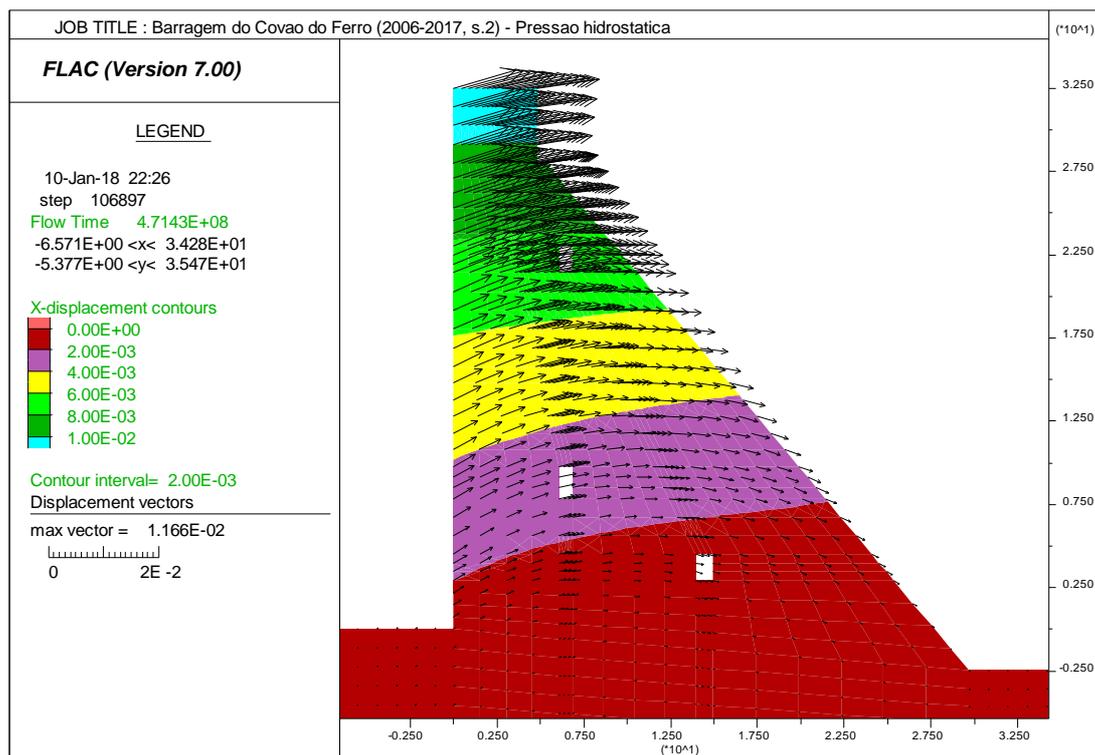


Figura 6.23 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 2006 e 2017). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 1, calculados através do programa FLAC 7.0

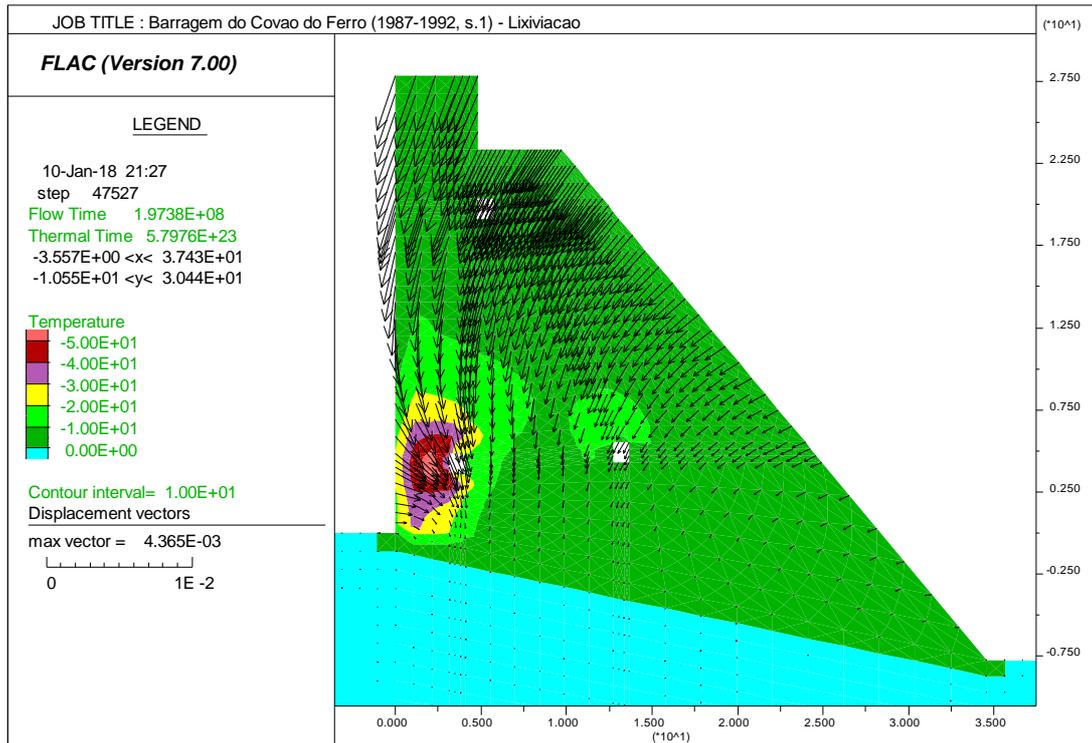


**Figura 6.24 - Barragem do Covão do Ferro (período entre 2006 e 2017). Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática da secção 2, calculados através do programa FLAC 7.0**

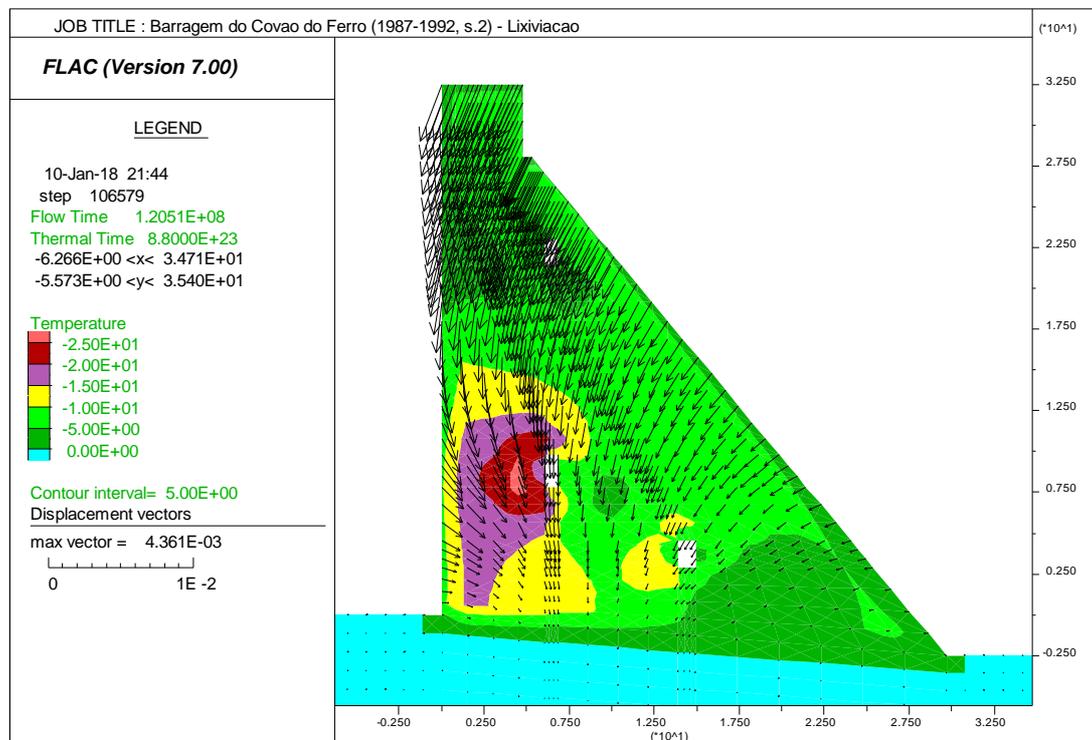
Apresentam-se no Quadro 6.8 dados e resultados da análise estrutural da barragem para os efeitos do tempo, nos diferentes períodos e secções em estudo (Figura 6.25 a Figura 6.28). É de realçar que os deslocamentos ao longo do tempo, antes de a obra ter sido reabilitada, tinham o sentido de montante, ao passo que após a sua reabilitação passaram a tender para jusante. No período 1987-1992 os deslocamentos horizontais para montante, de magnitude considerável, são devidos, essencialmente, à percolação de água infiltrada vinda da albufeira, tendo as infiltrações devidas à chuva e neve, pelo coroamento e paramento de jusante, um papel menos preponderante na lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de alvenaria de pedra. Os valores observados e calculados têm sempre o mesmo sinal, mas o ajuste, em termos de ordem de grandeza, pode considerar-se apenas razoável.

**Quadro 6.8 - Valores médios dos deslocamentos da barragem do Covão do Ferro. Parcela do tempo nos valores observados e efeito estimado da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias**

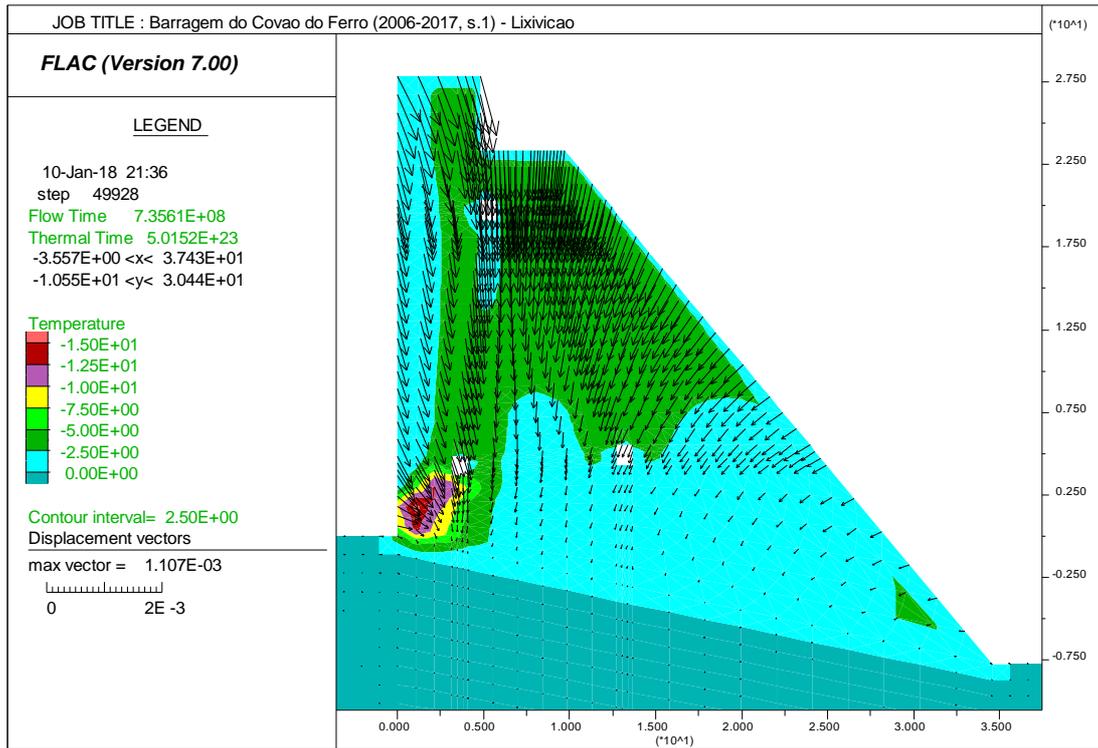
Período	Perfil	Deslocamentos jusante-montante (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
		Observados	Estimados	Observados	Estimados
1987-1992	Secção 1	7,3	1,3	-2,9	-4,1
	Secção 2	5,9	1,5	-3,1	-4,0
2006-2017	Secção 1	-3,4	-0,4	-0,3	-1,0
	Secção 2	-1,4	-0,5	-0,5	-1,1



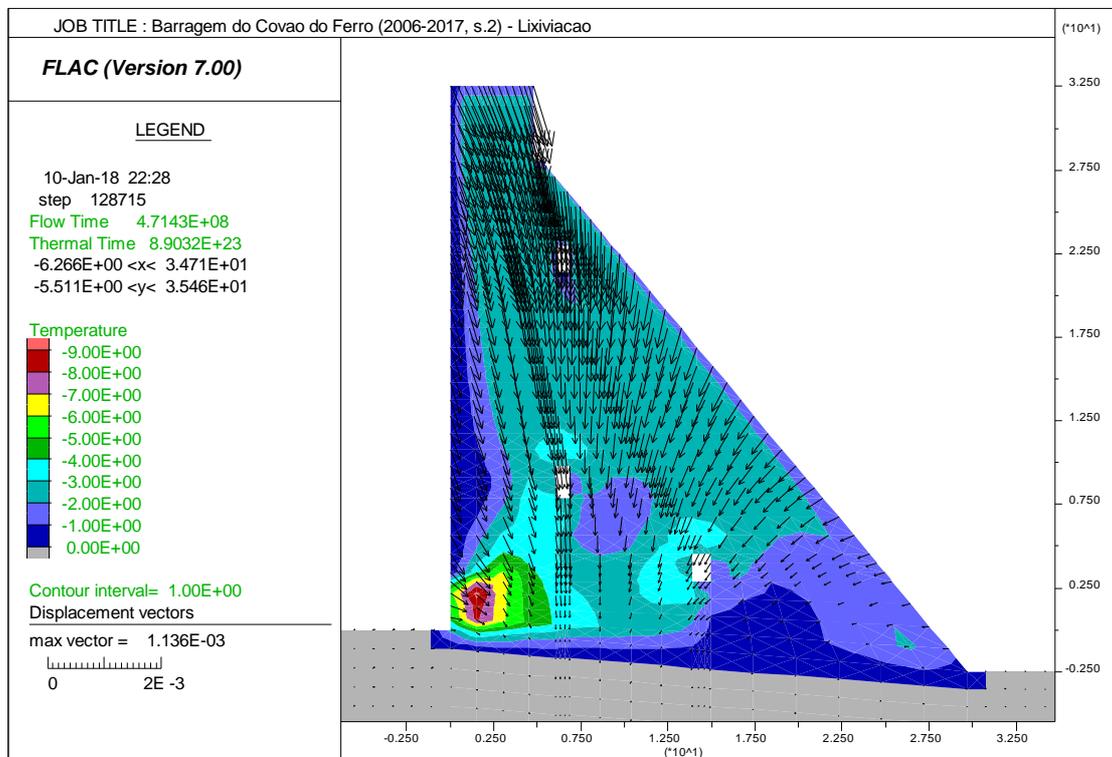
**Figura 6.25 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1992 (secção 1). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC**



**Figura 6.26 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1992 (secção 2). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC**



**Figura 6.27 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 2006 e 2017 (secção 1). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC**



**Figura 6.28 - Barragem do Covão do Ferro no período entre 2006 e 2017 (secção 2). Temperaturas equivalentes às deformações devidas às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados, calculados através do programa FLAC**

Pode concluir-se que, para a barragem do Covão do Ferro, os deslocamentos estimados pelos quatro modelos são coerentes com o comportamento observado nos períodos em análise, demonstrando a relevância da lixiviação das argamassas que ligam os blocos das barragens de alvenaria na sua evolução ao longo do tempo.

## 6.7 Análise crítica dos resultados obtidos

No Quadro 6.9 apresenta-se uma síntese dos valores estimados para módulo de elasticidade médio das alvenarias das barragens portuguesas em estudo, Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, obtidos considerando modelação estrutural e os deslocamentos observados devidos à pressão hidrostática.

**Quadro 6.9 - Valores estimados para o módulo de elasticidade médio das alvenarias das barragens portuguesas em estudo, obtidos através de modelos numéricos resolvidos com o programa FLAC 7.0**

Barragem	Ano de construção/reabilitação	Módulo de elasticidade (GPa)
Guilhofrei	1938	17,0
Andorinhas	1945	7,0
Freigil	1955	2,5
Covão do Ferro	1956	2,2
	2006	2,3

Os valores variam entre 17,0 GPa, para a barragem de Guilhofrei, que parece ser a barragem menos deteriorada, e 2,2 GPa, para a barragem do Covão do Ferro antes da sua reabilitação.

No Quadro 6.10 apresentam-se os valores médios do módulo de elasticidade de cinco barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas (Royet et al., 2013).

**Quadro 6.10 - Valores médios do módulo de elasticidade de cinco barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas**

Barragem	Ano de construção	Módulo de elasticidade (GPa)
Settons	1858	6,5
Ternay	1867	14,0
Pas de Riot	1878	7,1
Echapre	1898	6,0
Dardennes	1912	18,0

Na Figura 6.29 apresenta-se a comparação entre os valores dos módulos de elasticidade das barragens que constam do Quadro 6.9 e do Quadro 6.10, organizada em função do ano de construção ou de grande reabilitação das obras.

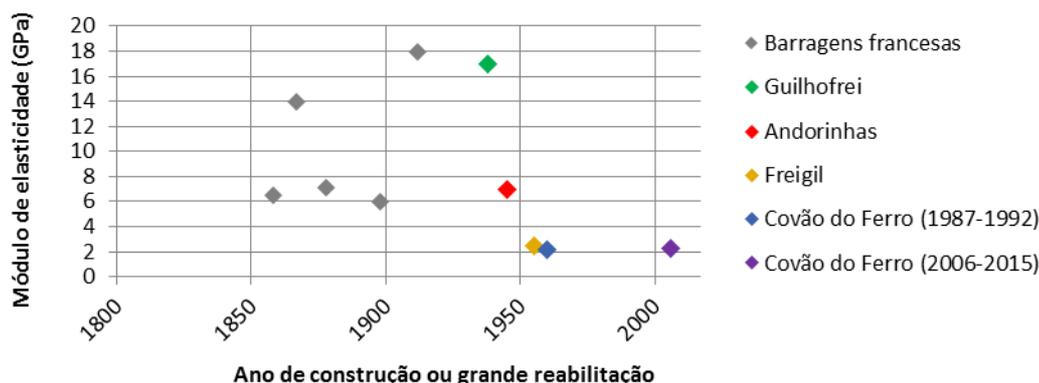


Figura 6.29 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade das barragens de alvenaria francesas (obtidos em ensaios de amostras carotadas) e das quatro barragens portuguesas em estudo (valores estimados a partir da análise de modelos numéricos)

Pode notar-se que os valores estimados do módulo de elasticidade de três barragens portuguesas são menores que os que foram obtidos em ensaios de amostras carotadas das barragens francesas, tendo apenas as barragens de Guilhofrei e Andorinhas valores da mesma ordem de grandeza das barragens francesas. Deve referir-se, contudo, que os valores de módulos de elasticidade e de resistência obtidos em ensaios de provetes são, em regra, maiores que os que se verificam em obra.

No que diz respeito à evolução dos deslocamentos devidos aos efeitos do tempo, concluiu-se que estes se podem atribuir, em boa medida, à lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, devido às infiltrações da água pelo paramento de montante. A deterioração das obras devido a este efeito parece estar associada ao valor do caudal repassado nas diferentes zonas do corpo das barragens.

Quadro 6.11 - Comparação dos resultados observados e estimados das barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias

Barragem	Período	Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
		Observados	Estimados	Observados	Estimados
Guilhofrei	1997 - 2015	3,1	0,13	-0,6	-0,12
Andorinhas	1997 - 2015	2,0	1,3	0,9	-1,3
Freigil	1998 - 2016	7,0	7,2	-1,6	-11,4
Covão do Ferro	1987 - 1992	7,3	1,3	-2,9	-4,1
		5,9	1,5	-3,1	-4,0
	2006 - 2017	-3,4	-0,4	-0,3	-1,0
		-1,4	-0,5	-0,5	-1,1

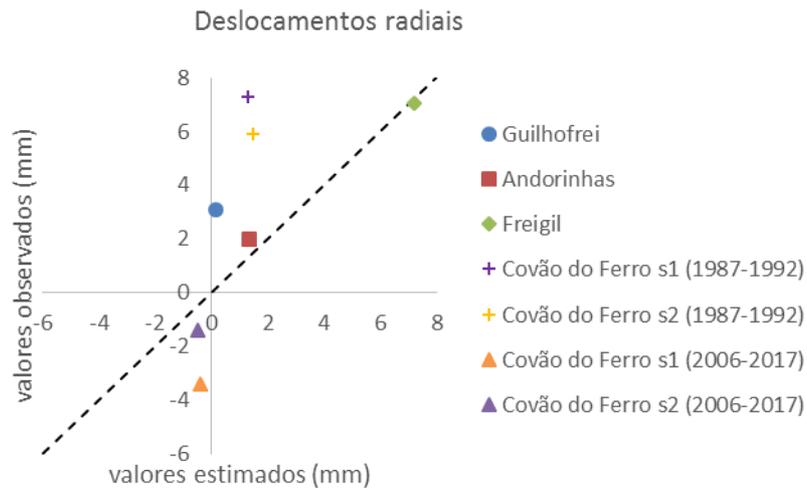


Figura 6.30 - Deslocamentos radiais. Comparação dos resultados da observação (efeitos do tempo) e dos valores estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, para as barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro

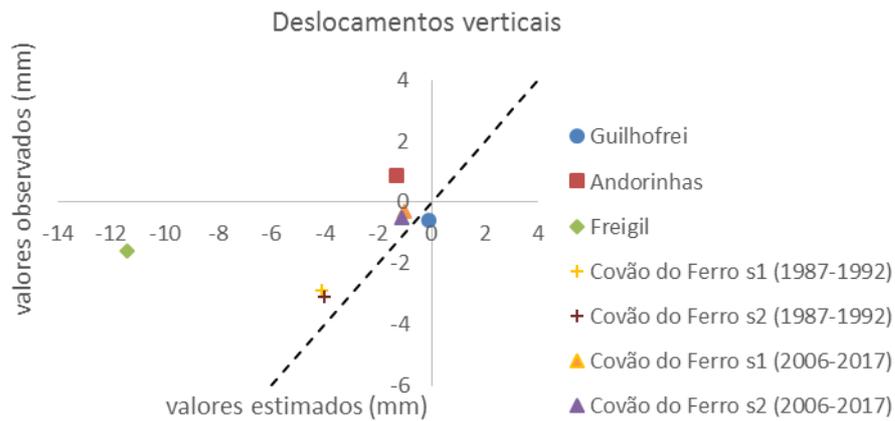


Figura 6.31 - Deslocamentos verticais. Comparação dos resultados da observação (efeitos do tempo) e dos valores estimados para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, para as barragens portuguesas de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro

## 7. Considerações finais

### 7.1 Contributo do trabalho para a engenharia de barragens

A análise do comportamento observado das barragens destina-se a apoiar o controlo da segurança das obras, por forma a garantir-se a funcionalidade, a fiabilidade e a durabilidade destas estruturas. Neste contexto, o objetivo principal da presente dissertação foi o estudo do comportamento, em condições de serviço, das barragens gravidade de alvenaria de pedra, considerando aproximações com modelos planos, com vista à comparação das respostas obtidas numericamente, para a percolação e para os efeitos estruturais, com os resultados da observação contínua das obras, para se inferir da adequabilidade deste tipo de modelos na interpretação do comportamento das obras, designadamente na avaliação da deterioração estrutural provocada pela lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de alvenaria de pedra. Os modelos foram resolvidos pelo método das diferenças finitas, utilizando o programa de cálculo automático FLAC. Como casos de estudo foram consideradas as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, pois são as obras portuguesas que têm monitorização de caudais e deslocamentos.

A análise do comportamento das barragens baseou-se nos resultados da observação de caudais infiltrados e de deslocamentos medidos por métodos geodésicos. Fez-se uma avaliação aproximada dos caudais infiltrados pelo corpo das obras com base em medições de caudais em drenos e bicas e uma análise quantitativa dos deslocamentos observados, para se obterem os efeitos devidos às principais ações, designadamente a pressão hidrostática, as variações anuais de temperatura e a deterioração estrutural devida à lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de alvenaria. Com os resultados do tratamento dos deslocamentos observados e a solicitação correspondente à pressão hidrostática sobre o paramento de montante estimaram-se, com os modelos estruturais, os módulos de elasticidade médios das alvenarias. Como resultados obtiveram-se valores dos módulos de elasticidade das alvenarias das quatro obras estudadas compreendidos entre 2,2 e 17,0 GPa.

Dado não constituir um dos objetivos do trabalho, os efeitos estruturais devidos às variações anuais de temperatura no corpo da barragem não foram analisados com os referidos modelos.

Os efeitos estruturais devidos à deterioração das barragens ao longo do tempo foram quantificados considerando a percolação através do corpo das barragens. Para tal, foram analisados modelos planos dos principais perfis das obras para estimar a permeabilidade média em função dos caudais repassados observados. Considerando essa permeabilidade, obtiveram-se os caudais em cada ponto das obras e fez-se uma estimativa da quantidade de massa perdida anualmente devida à dissolução de sais na água repassada. Por fim, procedeu-se à avaliação da distribuição pelo corpo das obras da quantidade de massa dissolvida, considerando uma proporcionalidade com o caudal repassado em cada ponto.

As aproximações consideradas, designadamente no que respeita à análise da percolação pelo corpo das obras, conduziram a resultados que, embora não sejam muito bons, indicam tendências coerentes entre causas e efeitos. Considera-se, assim, como muito positivos os resultados obtidos na presente dissertação, pois mostrou-se que a perda de rigidez das barragens de alvenaria de pedra e o conseqüente aumento dos seus deslocamentos ao longo do tempo, se podem atribuir, em boa medida, à deterioração por lixiviação das argamassas de ligação dos blocos.

## 7.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido na presente dissertação, constatou-se que há amplas áreas a explorar futuramente, tanto no que respeita ao estudo da deterioração dos materiais, designadamente através do desenvolvimento de trabalho experimental para caracterização da deformabilidade e resistência das alvenarias, como dos modelos numéricos para representação dos efeitos.

No que diz respeito aos modelos numéricos, os modelos de diferenças finitas, utilizados no âmbito desta dissertação em regime linear para simular as condições de serviço das obras, afigura-se terem sido adequados para tal fim. A grande questão da modelação matemática prende-se com as propriedades consideradas para os materiais, que importa obter por via experimental. O uso de outros métodos de análise de estruturas de blocos, designadamente do método dos elementos discretos, pode ser interessante para reproduzir cenários em que estejam envolvidos comportamentos marcadamente não-lineares, designadamente para ações sísmicas.

A deformabilidade média das alvenarias foi estimada, nos estudos realizados, a partir de resultados, limitados em quantidade, da observação de deslocamentos. Seria muito importante a realização de trabalhos de índole experimental para a caracterização das propriedades mecânicas da alvenaria aparelhada dos paramentos das barragens e da alvenaria de enchimento. Numa primeira abordagem deveria ser realizada uma recolha de amostras nas obras, para proceder a ensaios laboratoriais de caracterização dessas propriedades. Também teria muito interesse a caracterização experimental das propriedades dinâmicas globais da estrutura, através da realização de ensaios de vibração forçada.

Face aos resultados obtidos nas análises efetuadas, considera-se de interesse a consideração, no estudo da deterioração das barragens de alvenaria, da contribuição das águas das chuvas e da água proveniente da fundação. Considera-se também importante a comparação das propriedades físicas das alvenarias obtidas através de ensaios laboratoriais com os resultados obtidos através de modelos estruturais com os deslocamentos observados.

## Referências bibliográficas

- Andrade, Roberto M. 1983. *O controle da subpressão pela drenagem horizontal*. Engevix s.a., Rio de Janeiro.
- Aranda Gutiérrez, Fernando et al. 2003. *Las presas de abastecimiento en el marco de la ingeniería hidráulica romana: los casos de Proserpina y Cornalbo*. Mérida Excavaciones Arqueológicas.
- Batista, António L. e Farinha, Maria Luísa B. 2014. *Dimensionamento estrutural e controlo da segurança de pequenas barragens de betão*. Curso de projeto, construção e exploração de pequenas barragens, LNEC, Lisboa.
- Bretas, Eduardo M., Batista, António L., e Lemos, José V. 2015. *Análise da estabilidade de uma barragem gravidade antiga de alvenaria de pedra*. Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens, Foz do Iguaçu.
- Bretas, Eduardo M., Lemos, José V., e Lourenço, Paulo B. 2012. *Masonry dams: analysis of the historical profiles of Sazilly, Delocre and Rankine*. International Journal of Architectural Heritage, Lisboa.
- Bretas, Eduardo M., Lemos, José V., e Lourenço, Paulo B. 2013. *Engenharia de barragens. A barragem romana de Olisipo*. Construção Magazine, Julho/Agosto 2013, nº 56.
- Charles, Morrison e Brodie, Orrion 1916. *Masonry dam design including high masonry dams*. 2nd Edition, University of California, New York.
- EDP 2006. *Barragem de Freigil, relatório de análise de comportamento*. Relatório, EDP, Porto.
- EDP 2012. *Barragem de Freigil - Resultados da observação geodésica realizada em julho de 2012*. Relatório, EDP, Porto.
- EDP 2015. *Barragem de Andorinhas - Resultados de observação geodésica realizada em Abril de 2015*. Relatório, EDP, Porto.
- EDP 2016. *Aproveitamento hidroelétrico da Lagoa Comprida. Relatório de análise do comportamento*. EDP, Porto.
- EDP 2017. *Barragem de Freigil - Caudais infiltrados e a influência do canal de adução*. Relatório, EDP, Porto.
- Fernandes, Daladier 2016. *Avaliação da resposta estática de barragens gravidade de alvenaria de pedra de planta poligonal considerando modelos tridimensionais e planos*. Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Firmino, C. 2011. *Barragem romana - Belas*. Obtido em <http://olharescruzados.blogs.sapo.pt/29960.html>.
- FLAC 2011. *FLAC version 7.0 - User's Guide*. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc.
- Fortuna, Armando O. 2000. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos - Conceitos básicos e aplicações*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gomes, A. F. S. 1981. *Automatização das actividades de observação e análise quantitativa de resultados*. Tese de Especialista, LNEC, Lisboa.
- INAG 2001. *Curso de exploração e segurança de barragens*. Instituto da Água, Lisboa.
- LNEC 2010. *Barragem de Freigil - Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efectuada em janeiro de 2009*. Nota técnica nº 77/2010, DBB/NO, LNEC, Lisboa.
- LNEC 2013. *Barragem de Guilhofrei - Resultados da observação geodésica efetuados em novembro de 2013*. Nota técnica nº 40/2013, DBB/NGA, LNEC, Lisboa.
- LNEC 2014. *Barragem de Covão de Ferro. Observação geodésica efetuada em julho de 2014*. Nota técnica nº 31/2014, DBB/NGA, LNEC, Lisboa.
- LNEC 2016a. *Barragem de Andorinhas - Inspeções à estrutura e ao sistema de observação efetuadas em 2010 e 2013*. Nota técnica nº 25/2016, DBB/NO, LNEC, Lisboa.

## Referências bibliográficas

- LNEC 2016b. *Barragem de Guilhofrei - Inspeções à estrutura e ao sistema de observação efetuadas em 2008, 2010 e 2013*. Nota técnica nº 124/2016, DBB/NO, LNEC, Lisboa.
- LNEC 2016c. *Barragem de Guilhofrei e Andorinhas - Inspeções de abril de 2016. Análise sucinta do comportamento observado*. Apresentação, LNEC, Lisboa.
- LNEC 2016d. *Barragem do Covão do Ferro - Inspeções à estrutura e ao sistema de observação efetuadas no período de 2006 a 2013*. Nota técnica nº 10/2016, DBB/NO, LNEC, Lisboa.
- Mascarenhas, Abel A. F. T. 1979. *Percolação na fundação de barragens de betão*. Tese de Especialista, LNEC, Lisboa.
- Miranda, Manuel P. e Oliveira, Manuel S. 2005. *O reforço da segurança estrutural e hidráulico-operacional da barragem da Póvoa*. Seminário Barragens - Tecnologia, segurança e interação com a sociedade, CNPGB, Lisboa.
- Mora Ramos, José e Lemos, José V. 2000. *Barragens de alvenaria em exploração em Portugal - Deterioração, modelação, reabilitação*. Memória nº 823, LNEC, Lisboa.
- Muskat, Morris 1946. *The flow of homogeneous fluids through porous media*. McGraw-Hill Book Company, Inc, Michigan.
- Oliveira, Eduardo R. A. 1999. *Elementos da teoria da elasticidade*. IST Press, Lisboa.
- Royet, Paul, Laugier, Frédéric, Rosin-corre, Nathalie, Agresti, Pierre, e Salmi, Akim 2013. *Le parc des barrages Français en maçonnerie - Techniques de reconnaissance et de confortement French masonry dams : synthesis on investigation and rehabilitation technics*. French masonry dams: synthesis on investigation and rehabilitation technics.
- Silva, Henrique S. 1992. *Estudo do envelhecimento das barragens de betão e de alvenaria - Alteração físico-química dos materiais*. Tese de Especialista, LNEC, Lisboa.

## **Anexos**

(página deixada deliberadamente em branco)

## **Anexo I**

Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de águas das albufeiras e repassadas pelo corpo das barragens (elementos disponíveis no LNEC)

(página deixada deliberadamente em branco)

**Quadro I.1 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2004-05-17, com a água à cota 331,32 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	30	20,5	8,03	8,62	-0,59
1	29	20,8	7,65	8,73	-1,08
2	29	18,4	7,42	8,74	-1,32
5	29	17,3	6,28	7,80	-1,52
10	29	14,9	7,02	8,60	-1,58
15	29	14,3	6,72	8,50	-1,78
20	29	16,4	6,21	8,69	-2,48
25	29	14,7	6,05	8,64	-2,59
30	30	13,5	6,13	8,43	-2,30

**Quadro I.2 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2008-02-12, com a água à cota 328,50 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	36	11,0	7,08	8,64	-1,56
1	32	11,0	6,20	8,74	-2,54
2	32	10,3	5,99	8,76	-2,77
5	32	10,1	6,03	8,76	-2,73
10	31	10,1	5,96	8,67	-2,71
15	31	9,9	6,32	8,65	-2,33
20	31	9,9	6,24	8,68	-2,44

**Quadro I.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2010-04-13, com a água à cota 331,97 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	28	12,7	5,62	8,75	-3,13
1	28	13,0	5,42	8,74	-3,32
2	27	12,8	5,43	8,68	-3,25
5	27	12,7	5,38	8,69	-3,31
10	26	11,5	5,36	8,68	-3,32
15	26	11,3	5,26	8,56	-3,30
20	26	11,1	5,18	8,55	-3,37
25	26	10,9	5,13	8,47	-3,34
30	26	10,7	5,17	8,37	-3,20

**Quadro I.4 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2013-04-09, com a água à cota 332,80 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	26	12,2	7,26	8,58	-1,32
1	23	12,2	6,67	8,85	-2,18
2	23	11,9	6,41	8,92	-2,51
5	23	11,4	5,92	8,90	-2,98
10	23	11,3	5,78	8,92	-3,14
15	23	11,5	5,42	8,94	-3,52
20	23	11,4	5,21	9,02	-3,81
25	23	11,2	5,00	9,04	-4,04
30	24	11,0	5,03	9,04	-4,01

**Quadro I.5 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2016-04-05, com a água à cota 333,12 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	23	14,0	8,94	10,11	-1,17
1	23	13,3	8,63	10,11	-1,48
2	23	13,0	8,48	10,04	-1,56
5	22	12,1	8,39	10,05	-1,66
10	21	11,7	8,31	10,11	-1,80
15	20	12,0	8,24	10,05	-1,81
20	21	11,4	8,28	10,06	-1,78
25	22	11,5	8,13	10,06	-1,93
30	20	11,4	8,16	10,06	-1,90

**Quadro I.6 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2004-05-17, com a água à cota 331,32 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB6	143	12,2	11,48	11,34	0,14

**Quadro I.7 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2006-12-05, com a água à cota 332,70 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB6	126	14,1	11,05	10,90	0,15

**Quadro I.8 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2010-04-13, com a água à cota 331,97 m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
DB6	533	12,2	10,76	10,79	-0,03

**Quadro I.9 - Barragem de Guilhofrei. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de um dreno, em 2013-04-09, com a água à cota 332,80 m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
DB6	441	11,9	10,21	10,20	0,01

**Quadro I.10 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2004-05-18, com a água à cota 187,80 m**

Profundidade (m)	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
0	32	15,9	7,87	8,82	-0,95
1	31	15,0	7,49	8,60	-1,11
2	31	14,4	7,17	8,51	-1,34
5	31	14,6	6,72	8,50	-1,78
10	31	14,4	6,60	8,43	-1,83
12	31	14,6	6,28	8,34	-2,06

**Quadro I.11 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2008-02-13, com a água à cota 187,30 m**

Profundidade (m)	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
0	35	9,8	6,70	8,66	-1,96
1	35	9,3	6,26	8,67	-2,41
2	35	9,2	6,21	8,64	-2,43
5	35	9,3	6,15	8,64	-2,49
10	34	9,3	6,15	8,68	-2,53

**Quadro I.12 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2010-04-14, com a água à cota 188,10 m**

Profundidade (m)	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
0	29	12,4	7,63	9,30	-1,67
1	29	12,1	7,42	8,80	-1,38
2	28	11,8	7,43	8,66	-1,23
5	28	12,0	7,34	8,60	-1,26
10	28	11,6	7,28	8,58	-1,30
13	28	11,5	7,14	8,50	-1,36

**Quadro I.13 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2016-04-05, com a água à cota 187,78 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	28	13,5	9,38	10,38	-1,00
1	23	12,3	9,30	10,26	-0,96
2	25	13,1	9,06	10,23	-1,17
5	23	11,8	8,95	10,22	-1,27
10	22	11,8	8,85	10,19	-1,34
13	22	11,7	8,76	10,20	-1,44

**Quadro I.14 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2004-05-18, com a água à cota 187,80 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB2	251	14,6	10,32	10,15	0,17
DB9	169	14,1	10,09	9,83	0,26

**Quadro I.15 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-12-06, com a água à cota 188,30 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB1	149	14,8	10,89	10,68	0,21
DB2	411	14,5	10,46	10,29	0,17
DB9	211	14,3	9,86	9,91	-0,05
DB10	443	14,1	10,07	10,35	-0,28

**Quadro I.16 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2008-02-13, com a água à cota 187,30 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB2	179	10,6	10,40	10,20	0,20
DB9	144	10,3	10,30	10,04	0,26

**Quadro I.17 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2010-04-14, com a água à cota 188,10 m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
DB2	245	13,6	10,29	10,05	0,24
DB9	136	12,5	10,03	9,70	0,33
DB15	634	12,1	10,96	10,83	0,13

**Quadro I.18 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2013-04-10, com a água à cota 188,00 m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
DB2	352	11,8	10,93	10,16	0,77
DB9	133	11,1	10,05	9,71	0,34
DB15	463	11,8	10,57	10,23	0,34

**Quadro I.19 - Barragem de Andorinhas. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2016-04-05, com a água à cota 187,78 m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
DB1	238	12,0	11,71	11,39	0,32
DB2	319	11,8	11,77	11,63	0,14
DB9	130	11,2	11,36	11,00	0,36
DB10	183	11,0	11,57	11,19	0,38
DB15	476	11,9	12,13	11,88	0,25

**Quadro I.20 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2005-07-11, com a água à cota 312,90 m**

Profundidade (m)	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
0	42	24,9	7,83	7,36	0,47
1	42	23,2	7,73	8,20	-0,47
5	42	22,6	7,56	8,09	-0,53
10	46	21,0	7,13	7,85	-0,72

**Quadro I.21 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2007-03-27, com a água à cota 314,20 m**

Profundidade (m)	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
0	35	9,7	6,78	7,56	-0,78
1	36	9,3	6,72	7,64	-0,92
2	36	9,4	6,83	7,76	-0,93
5	37	9,4	6,84	7,79	-0,95
9	36	9,4	6,76	7,61	-0,85

**Quadro I.22 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água a albufeira, em 2015-02-18, com a água à cota 316,20 m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
1	24	7,4	6,90	9,93	-3,03
5	24	7,0	7,31	9,96	-2,65
10	24	6,6	7,35	9,98	-2,63

**Quadro I.23 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2005-07-11, com a água à cota 312,90 m**

Bicas	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
Bica 3	58	19,8	6,76	7,39	-0,63
Bica 5	125	26,0	6,34	7,34	-1,00

**Quadro I.24 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2007-03-27, com a água à cota 314,20 m**

Bicas	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
Bica 2	31	8,7	6,88	7,78	-0,90
Bica 3	45	10,0	6,62	7,33	-0,71
Bica 5	175	12,4	6,70	7,76	-1,06

**Quadro I.25 - Barragem de Freigil. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2015-02-18, com a água à cota 316,20 m**

Bicas	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
Bica 1	32	7,9	7,43	9,81	-2,38
Bica 2	34	6,4	7,40	9,75	-2,35
Bica 3	34	7,7	7,32	9,72	-2,40
Bica 4	27	7,0	7,29	9,86	-2,57
Bica 5	74	9,7	6,42	8,81	-2,39

**Quadro I.26 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-10-11, com a água à cota 1550,39 (3,90) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	32	11,6	8,00	9,21	-1,21

**Quadro I.27 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-10-30, com a água à cota 1568,89 (22,40) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	10	11,6	7,99	8,20	-0,21
5	10	10,7	7,47	8,33	-0,86
10	7	10,7	7,23	8,46	-1,23
15	7	10,7	7,06	7,93	-0,87

**Quadro I.28 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2006-11-16, com a água à cota 1577,09 (30,60) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	10	9,2	7,20	8,69	-1,49
1	10	8,9	7,03	8,76	-1,73
2	10	8,4	6,84	8,73	-1,89
5	10	8,3	6,69	8,76	-2,07
10	10	8,6	6,59	8,77	-2,18
15	10	8,6	6,45	8,73	-2,28
20	10	8,5	6,30	8,74	-2,44
25	10	8,5	6,43	8,80	-2,37

**Quadro I.29 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2008-06-16, com a água à cota 1566,99 (20,50) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	26	13,5	8,00	8,84	-0,84
1	27	13,4	7,40	8,78	-1,38
2	25	13,5	6,99	8,83	-1,84
5	25	12,1	6,88	8,81	-1,93
10	25	9,2	6,89	8,73	-1,84
15	25	8,6	6,73	8,69	-1,96

**Quadro I.30 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2009-10-20, com a água à cota 1562,79 (16,30) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	22	12,5	8,48	8,64	-0,16
1	22	11,9	8,08	9,03	-0,95
2	21	12,0	7,37	8,25	-0,88
5	21	12,1	6,81	8,43	-1,62
10	21	11,8	6,29	8,28	-1,99
15	21	12,0	6,05	8,22	-2,17

**Quadro I.31 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2010-05-17, com a água à cota 1569,29 (22,80) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	21	12,1	6,43	8,57	-2,14
1	23	10,2	6,12	8,61	-2,49
2	20	8,5	6,06	8,60	-2,54
5	20	8,0	5,89	8,66	-2,77
10	20	7,4	5,72	8,62	-2,90
15	20	7,4	5,50	8,64	-3,14
20	20	7,4	5,64	8,59	-2,95

**Quadro I.32 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2011-06-15, com a água à cota 1558,51 (12,02) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	21	18,5	7,46	8,93	-1,47
1	20	17,6	7,29	8,88	-1,59
2	20	15,5	7,04	8,88	-1,84
5	20	14,3	6,83	8,65	-1,82
10	22	13,5	6,40	8,47	-2,07

**Quadro I.33 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2012-11-06, com a água à cota 1575,29 (28,80) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	29	6,7	7,01	8,97	-1,96
1	27	6,6	6,75	8,73	-1,98
2	27	6,7	5,92	8,62	-2,70
5	27	6,5	5,58	8,51	-2,93
10	27	6,3	5,37	8,52	-3,15
15	27	6,2	5,18	8,48	-3,30
20	27	6,3	5,07	8,48	-3,41
25	27	6,3	4,81	8,38	-3,57

**Quadro I.34 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2013-10-22, com a água à cota 1570,59 (24,10) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	16	10,7	6,54	8,54	-2,00
1	16	10,7	6,03	8,77	-2,74
2	17	11,0	5,90	8,88	-2,98
5	17	11,0	5,61	8,90	-3,29
10	17	10,9	5,65	8,84	-3,19
15	16	11,3	5,42	8,90	-3,48
20	16	10,9	5,38	8,97	-3,59

**Quadro I.35 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água da albufeira, em 2015-09-22, com a água à cota 1565,43 (18,94) m**

Profundidade (m)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
0	36	14,5	7,96	10,28	-2,32
1	27	14,1	8,02	10,29	-2,27
2	27	14,1	7,65	10,35	-2,70
5	28	13,9	7,32	10,35	-3,03
10	27	13,4	7,15	10,28	-3,13
15	28	13,1	6,82	10,14	-3,32

**Quadro I.36 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-10-11, com a água à cota 1550,39 (3,90) m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
D1	132	14,3	9,57	9,02	0,55
D4	351	11,6	10,87	10,65	0,22

**Quadro I.37 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-10-30, com a água à cota 1568,89 (22,40) m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
D1	95	12,3	8,47	8,38	0,09
D4	101	10,6	9,42	9,00	0,42

**Quadro I.38 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2006-11-16, com a água à cota 1577,09 (30,60) m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
D1	77	8,3	9,29	9,15	0,14
D2	77	7,8	9,58	9,52	0,06
D3	32	8,6	8,36	8,90	-0,54
D4	69	8,1	9,65	9,25	0,40
D5	141	8,6	10,17	9,85	0,32

**Quadro I.39 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2008-06-16, com a água à cota 1566,99 (20,50) m**

Dreno	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH		Índice de agressividade ( $i=\text{pH}-\text{pH}_s$ )
			Inicial – pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Final – pH <sub>s</sub> ( $\text{H}_2\text{O}+\text{CaCO}_3$ )	
D4	51	8,4	8,18	8,69	-0,51
D5	84	8,2	9,27	9,17	0,10

**Quadro I.40 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2011-06-15, com a água à cota 1558,51 (12,02) m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
D4	51	13,2	8,52	8,25	0,27
D5	102	12,9	8,57	8,08	0,49
BP4D	143	9,7	9,88	9,34	0,54
BP4E	169	10,1	10,08	9,55	0,53
BP5	54	12,2	8,90	8,66	0,24

**Quadro I.41 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2013-10-22, com a água à cota 1570,59 (24,10) m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
D4	42	10,8	7,86	9,02	-1,16
D5	40	10,7	7,28	8,95	-1,67

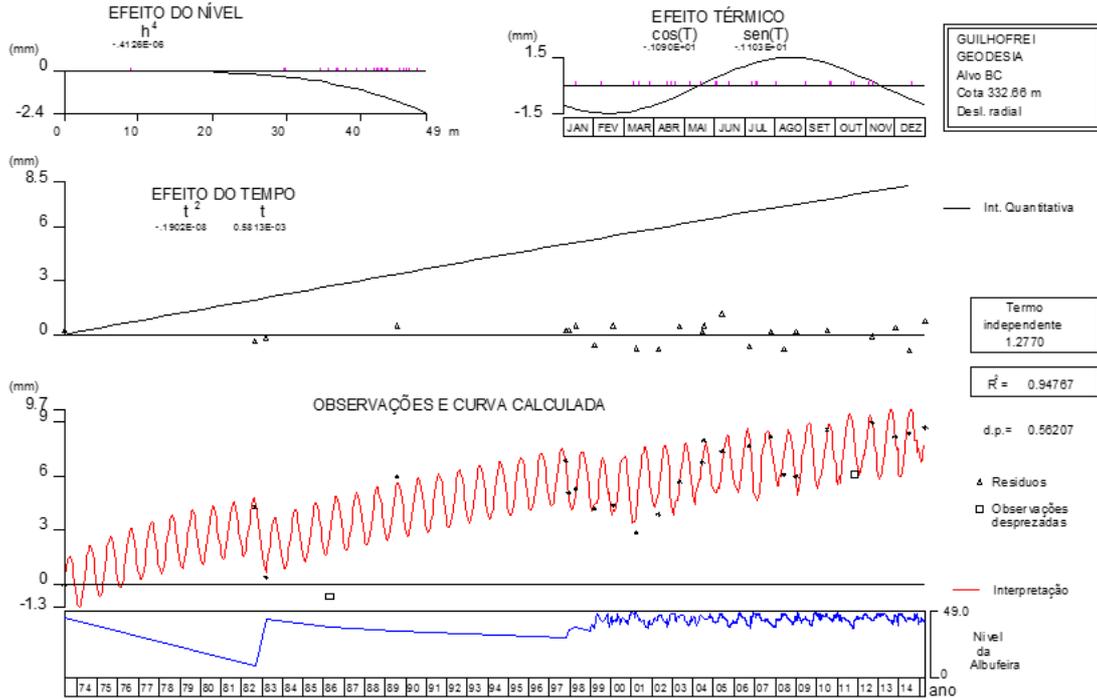
**Quadro I.42 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados dos ensaios hidroquímicos efetuados em amostras de água de alguns drenos, em 2015-09-22, com a água à cota 1565,43 (18,94) m**

Dreno	Condutividade (µS/cm)	Temperatura (°C)	pH		Índice de agressividade (i=pH-pH <sub>s</sub> )
			Inicial – pH (H <sub>2</sub> O)	Final – pH <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O+CaCO <sub>3</sub> )	
D4	36	14,6	8,37	10,20	-1,83
D5	57	13,4	9,22	9,87	-0,65
BP3	488	12,1	12,00	11,78	0,22
BP4D	149	11,5	11,04	10,71	0,33
BP4E	175	11,7	11,26	10,86	0,40
BP5	56	14,0	9,64	10,23	-0,59
BDF E	239	11,8	11,62	11,26	0,36

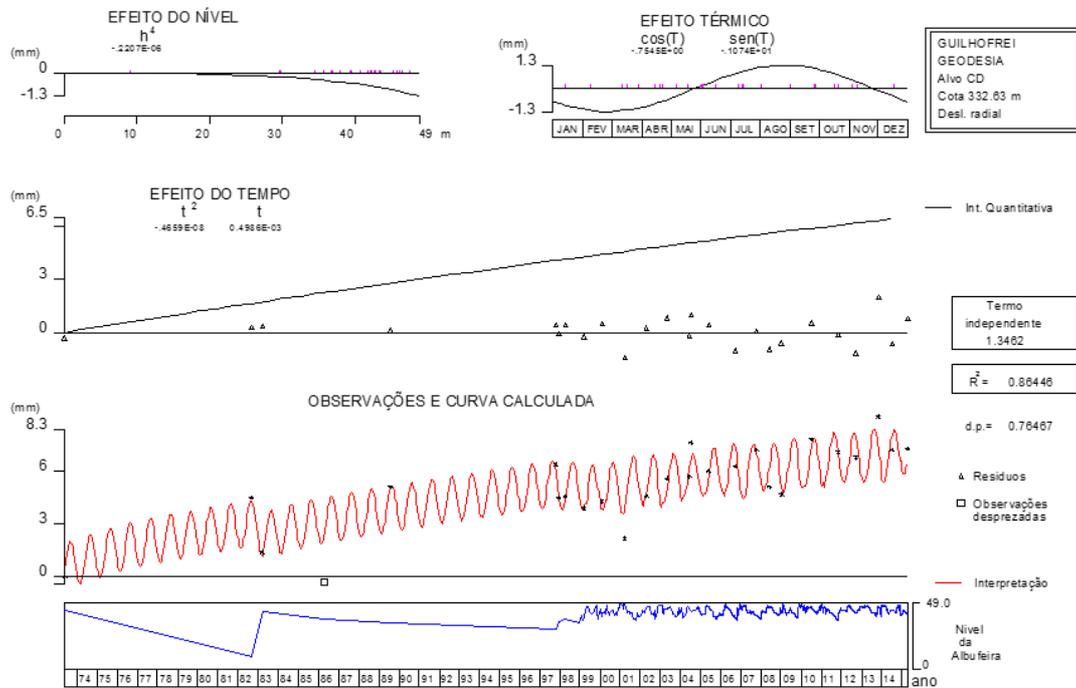
## **Anexo II**

Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica e verticais observados por nivelamento (elementos disponíveis no LNEC)

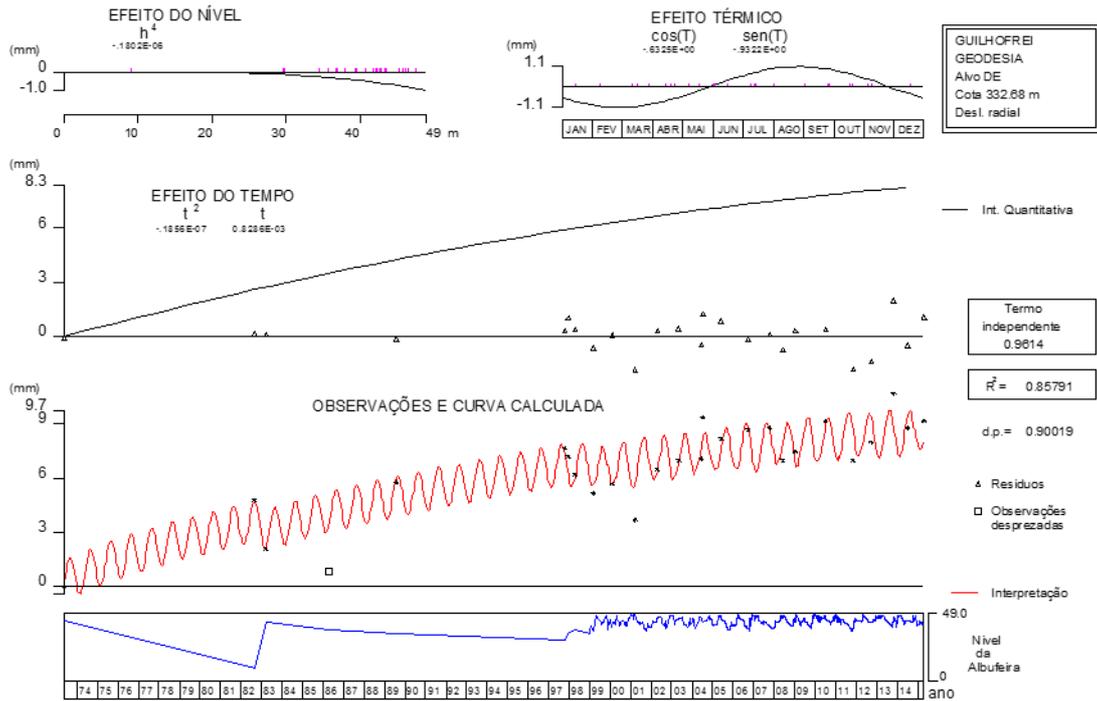
(página deixada deliberadamente em branco)



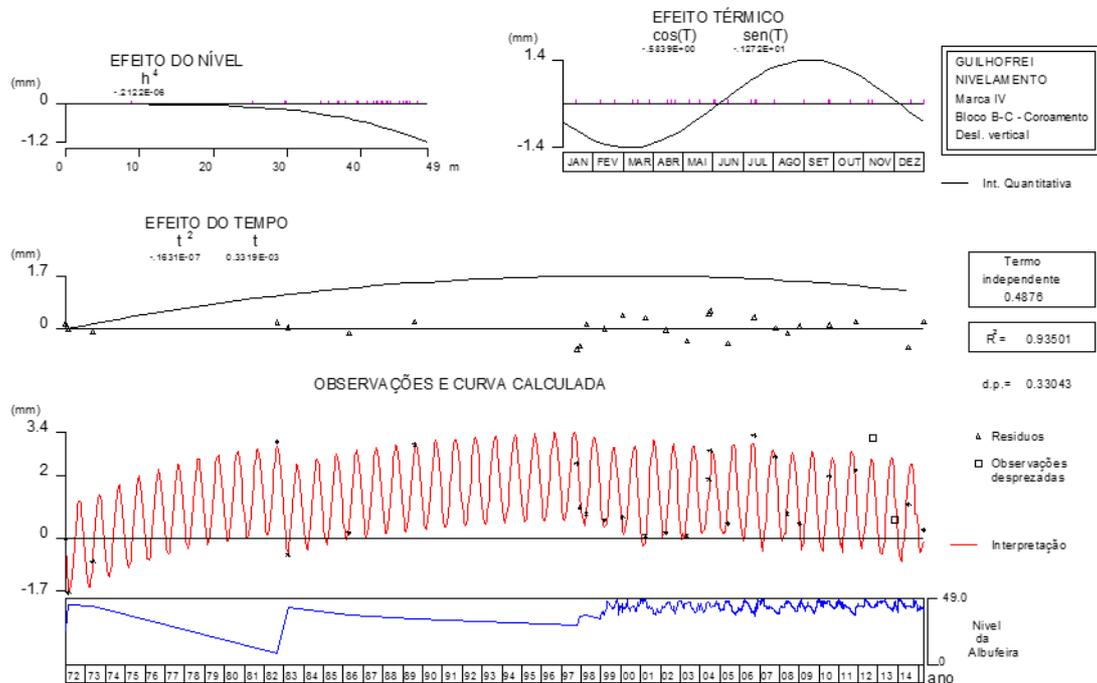
**Figura II.1 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto BC do coroamento, entre 1973 e 2015.**



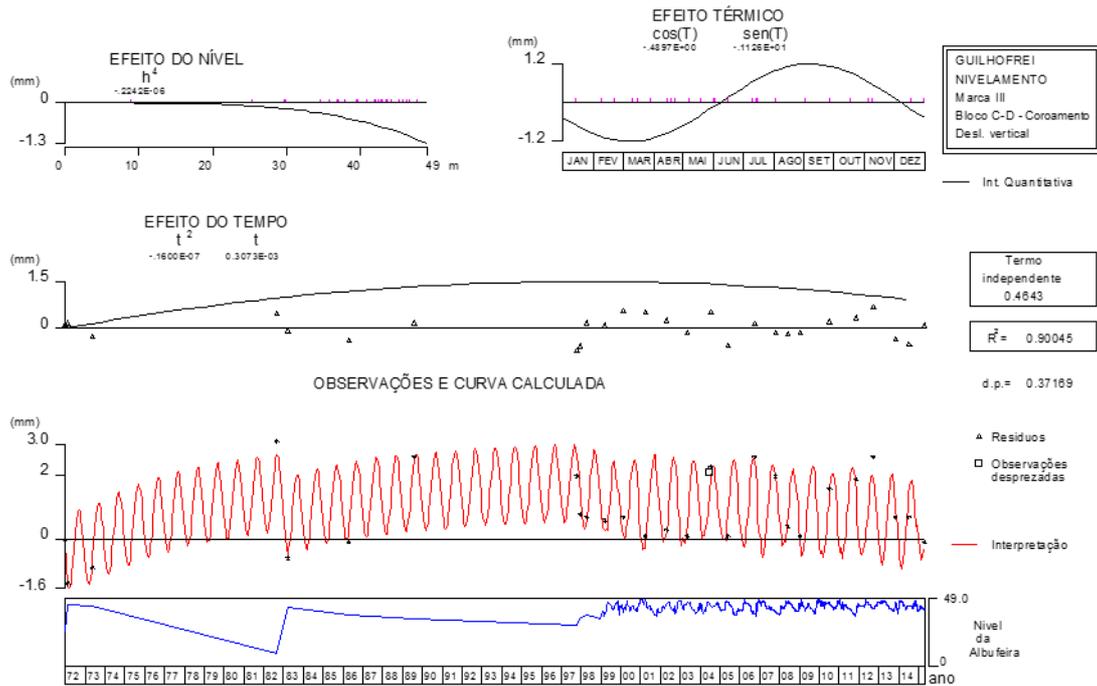
**Figura II.2 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto CD do coroamento, entre 1973 e 2015.**



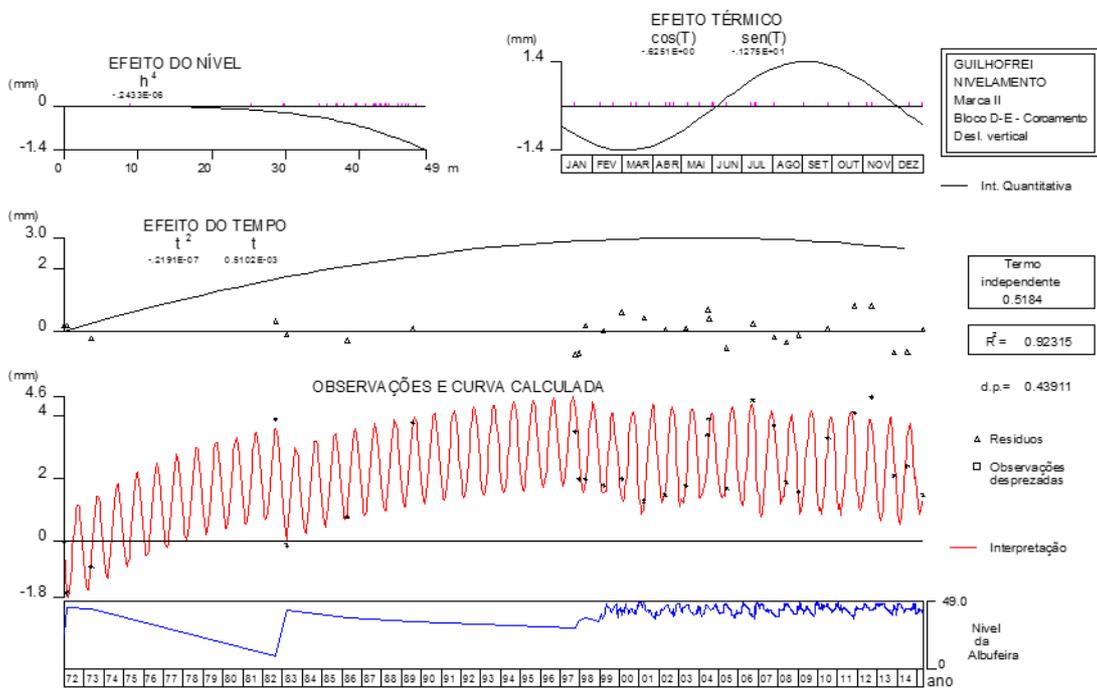
**Figura II.3 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto DE do coroamento, entre 1973 e 2015.**



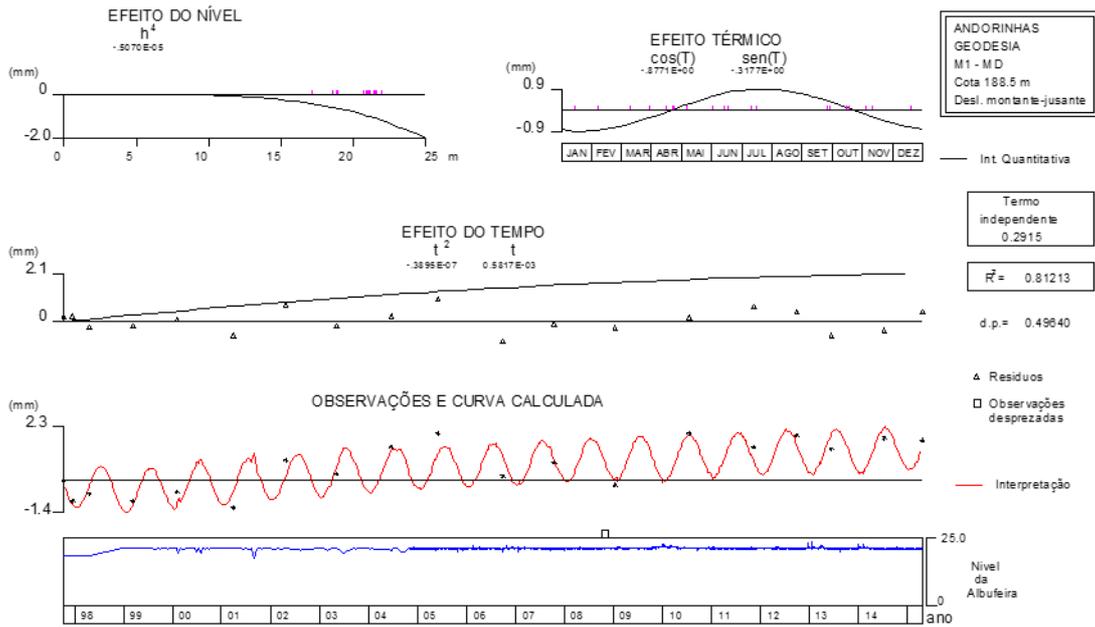
**Figura II.4 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto IV (bloco B-C) do coroamento, entre 1972 e 2015.**



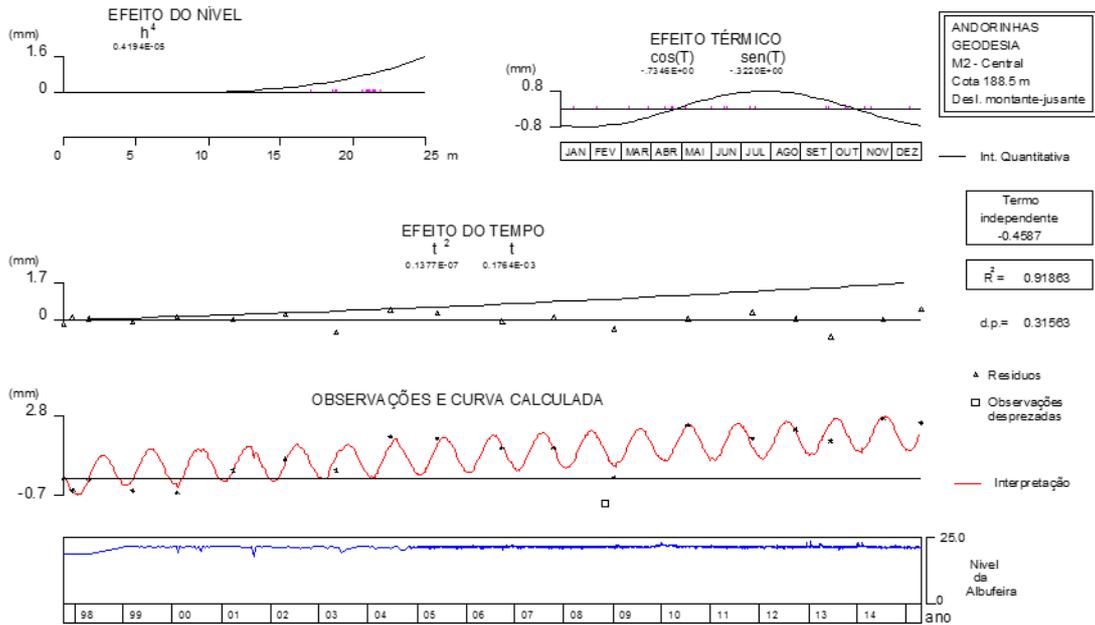
**Figura II.5 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto III (bloco C-D) do coroamento, entre 1972 e 2015.**



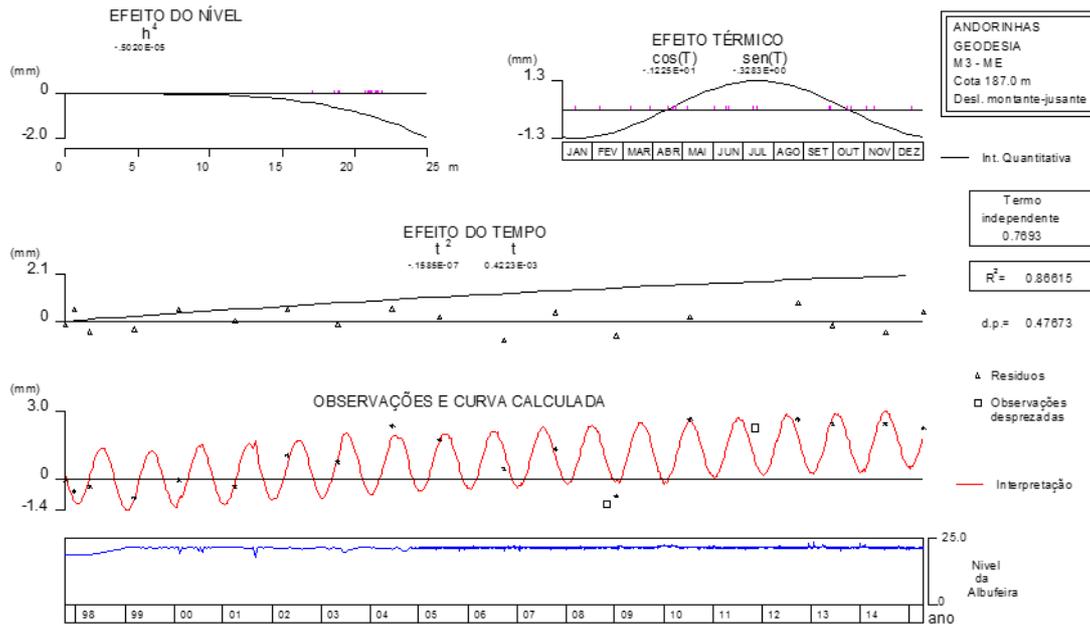
**Figura II.6 - Barragem de Guilhofrei. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto II (bloco D-E) do coroamento, entre 1972 e 2015.**



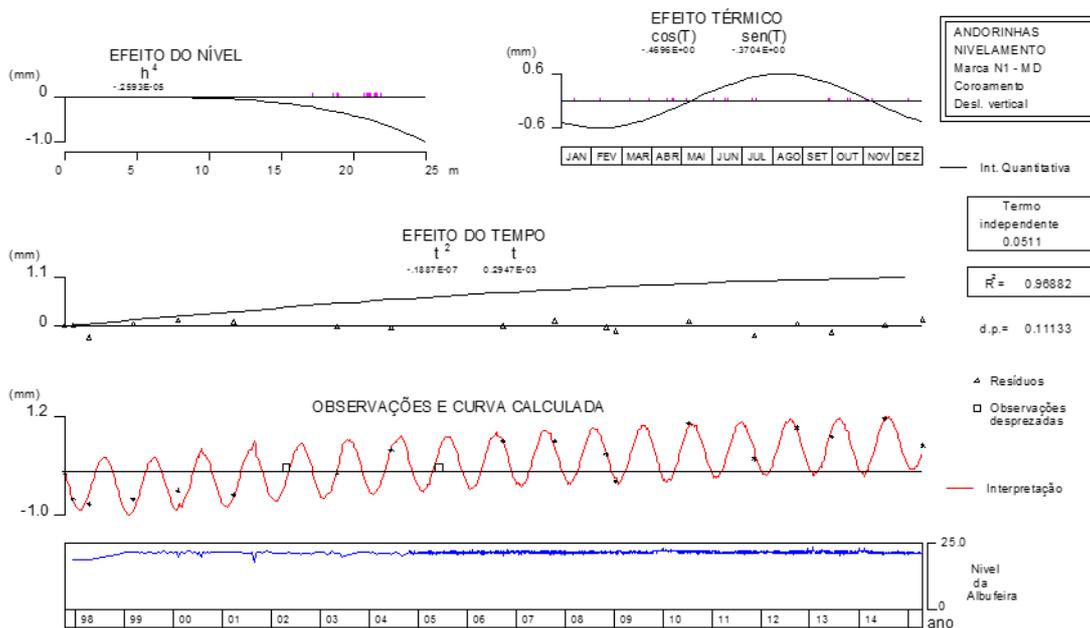
**Figura II.7 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M1 (margem direita) do coroamento, entre 1997 e 2015.**



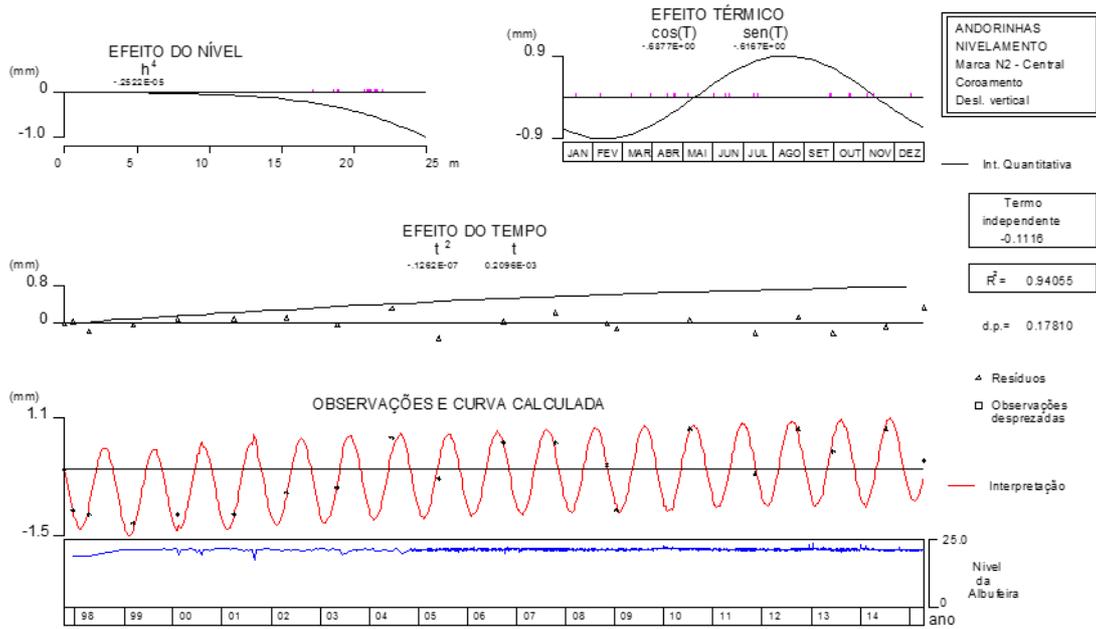
**Figura II.8 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M2 (central) do coroamento, entre 1997 e 2015.**



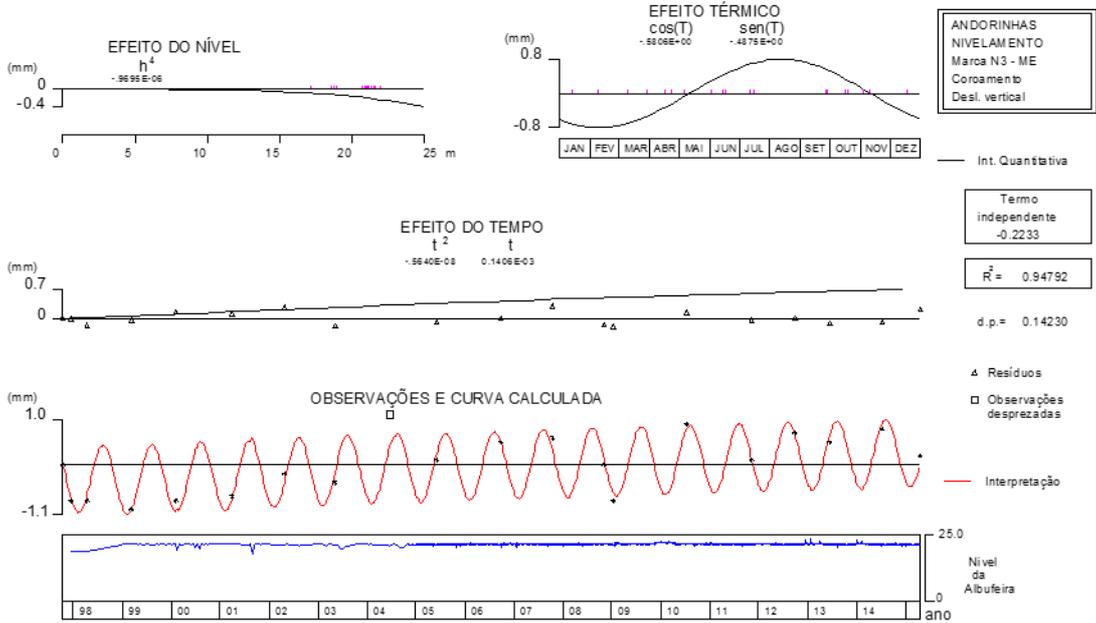
**Figura II.9 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos montante-jusante observados por triangulação geodésica no ponto M3 (margem esquerda) do coroamento, entre 1997 e 2015.**



**Figura II.10 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N1 (margem direita) do coroamento, entre 1998 e 2015.**



**Figura II.11 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N2 (central) do coroamento, entre 1998 e 2015.**



**Figura II.12 - Barragem de Andorinhas. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N3 (margem esquerda) do coroamento, entre 1998 e 2015.**

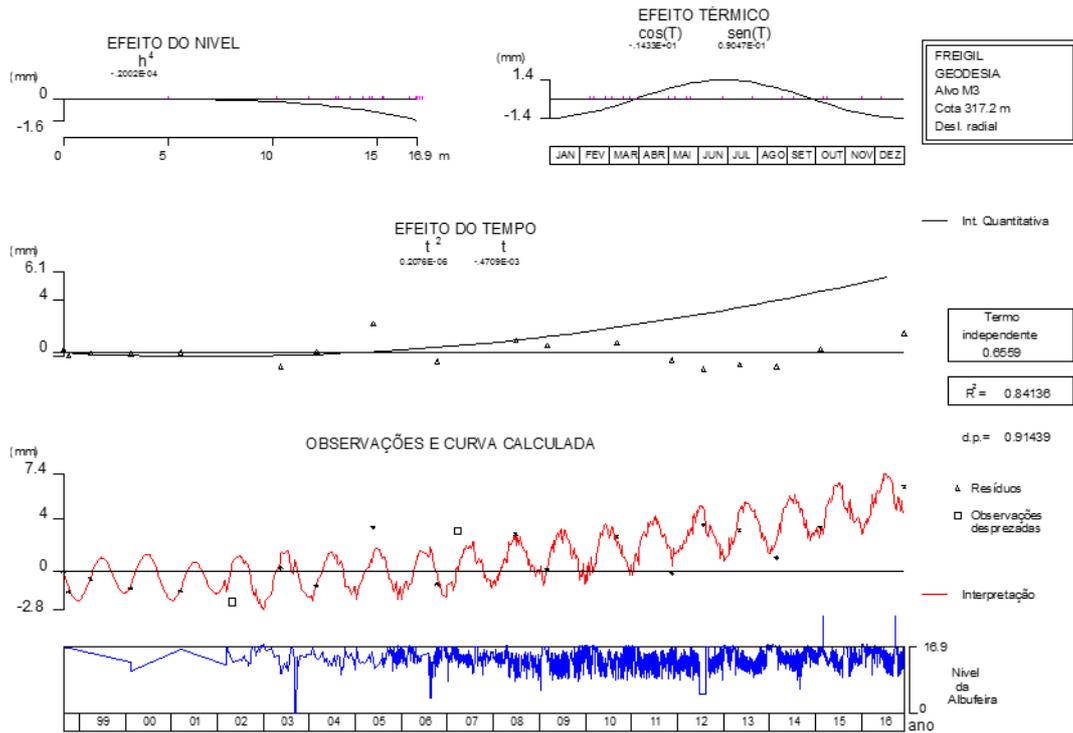


Figura II.13 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M3 do coroamento, entre 1998 e 2016.

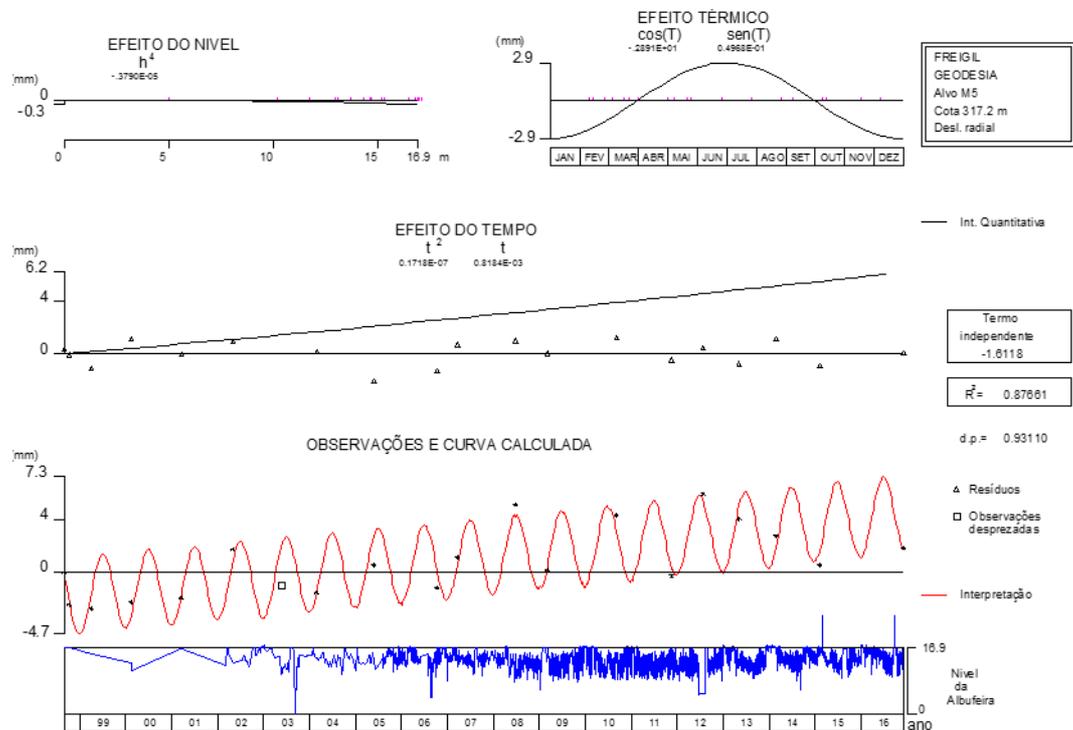


Figura II.14 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M5 do coroamento, entre 1998 e 2016.

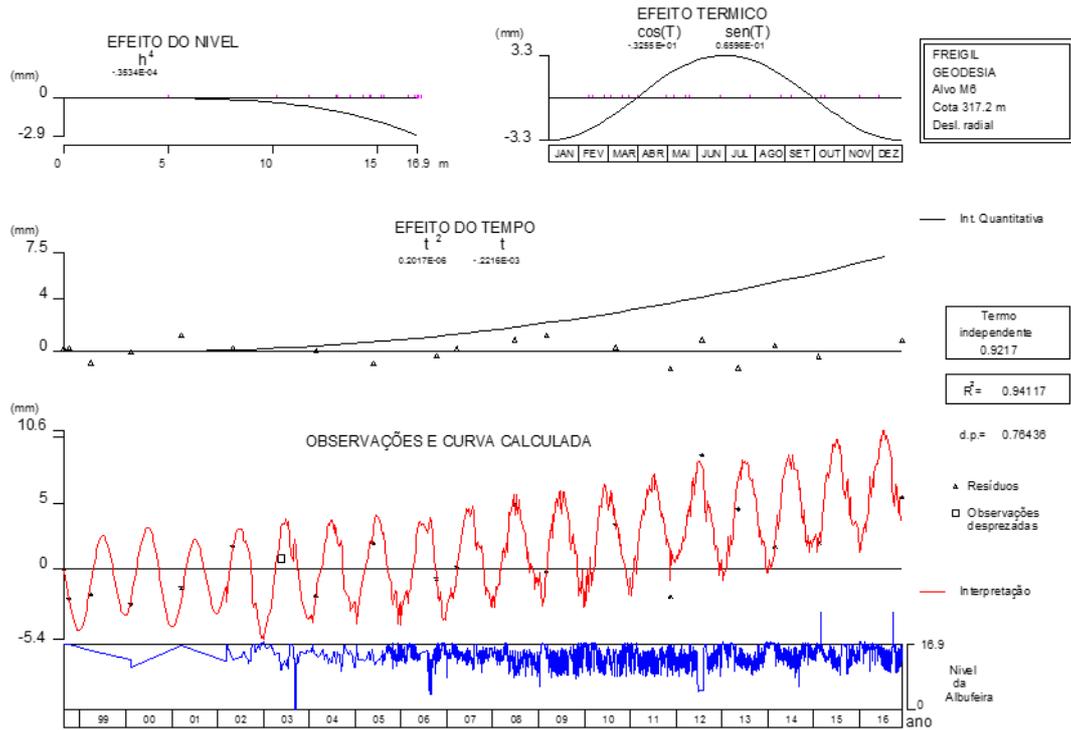


Figura II.15 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M6 do coroamento, entre 1998 e 2016.

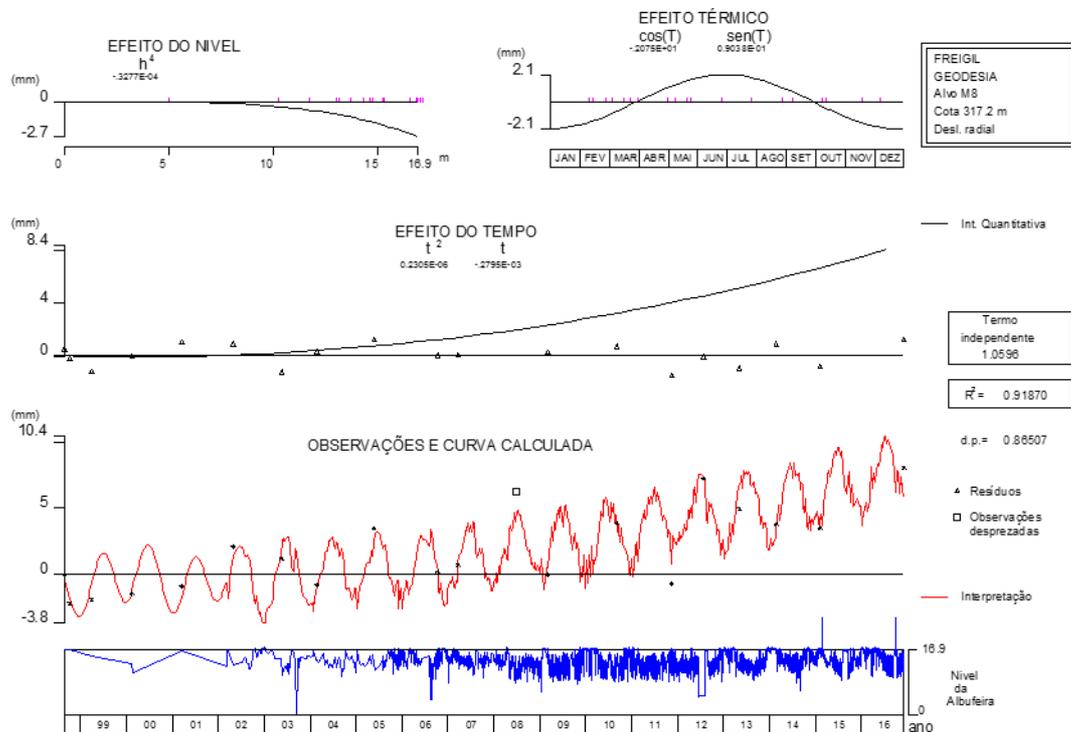
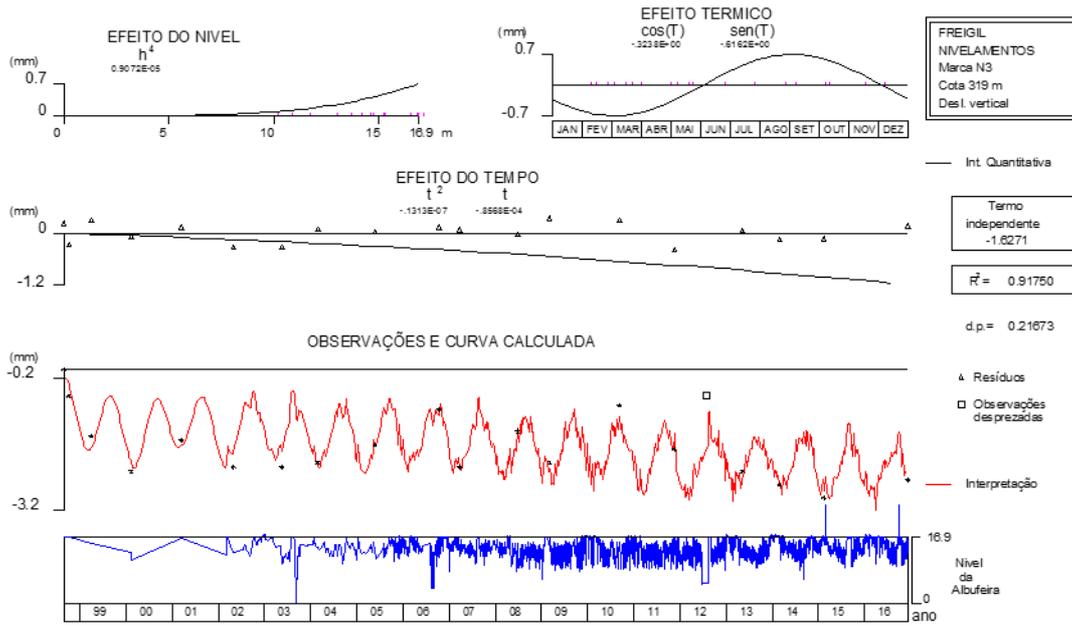
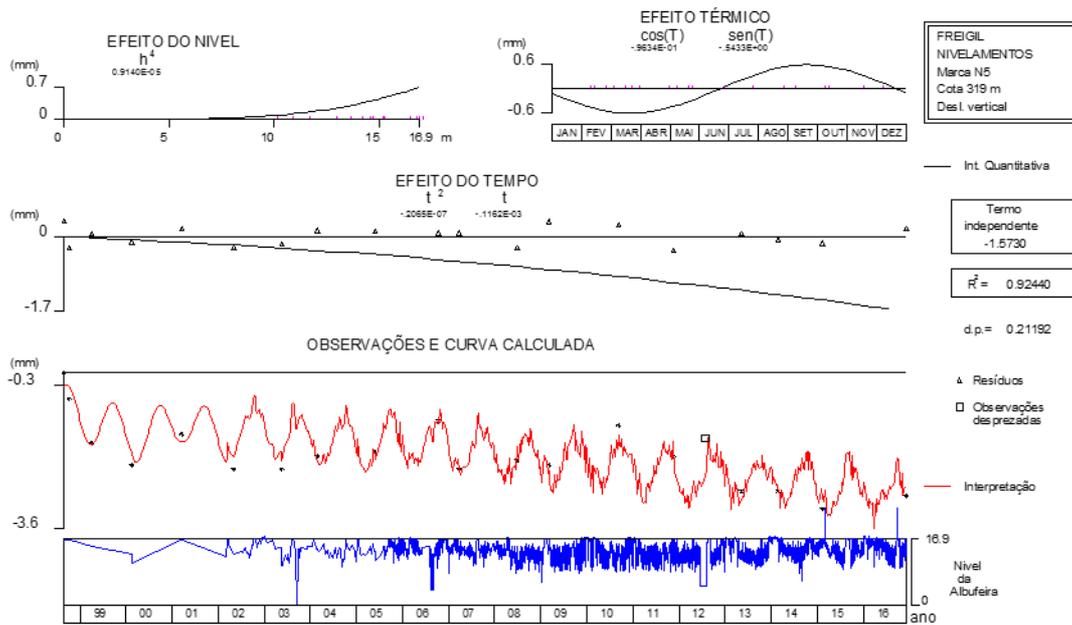


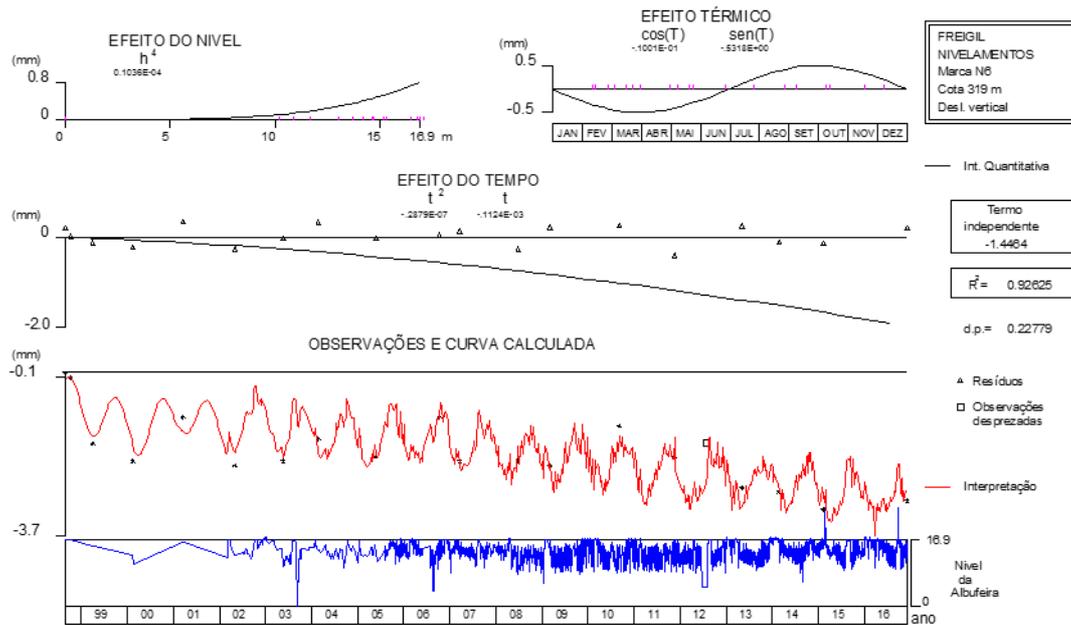
Figura II.16 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto M8 do coroamento, entre 1998 e 2016.



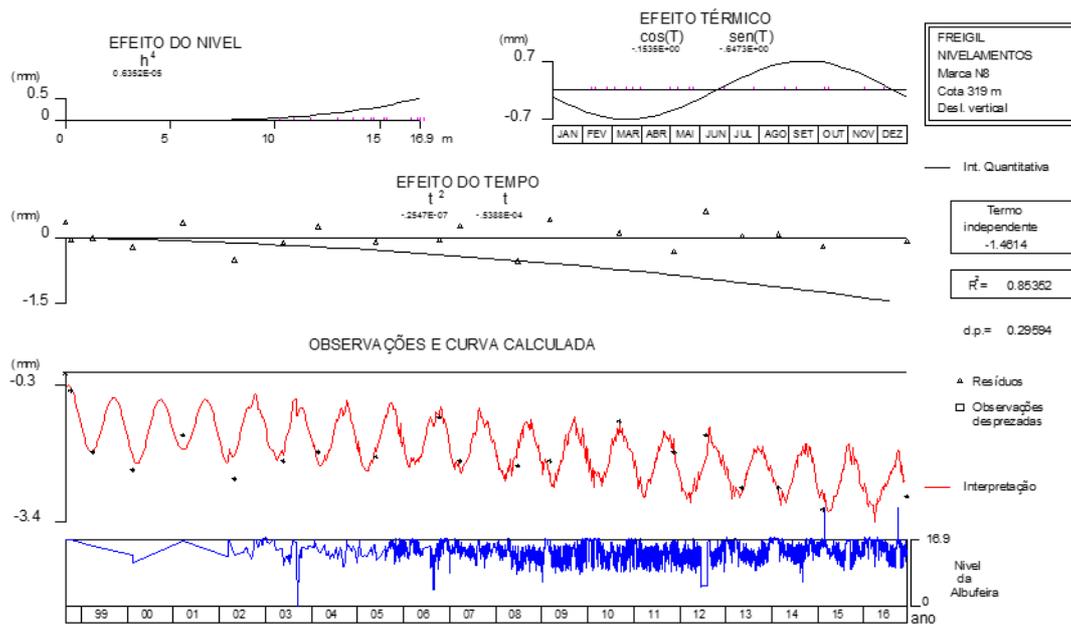
**Figura II.17 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N3 do coroamento, entre 1998 e 2016.**



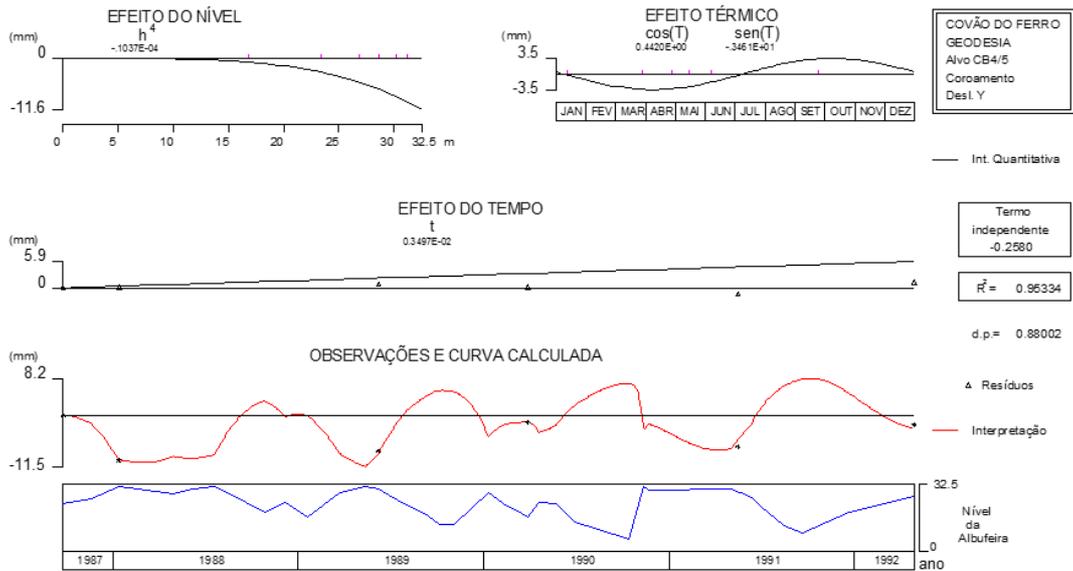
**Figura II.18 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N5 do coroamento, entre 1998 e 2016.**



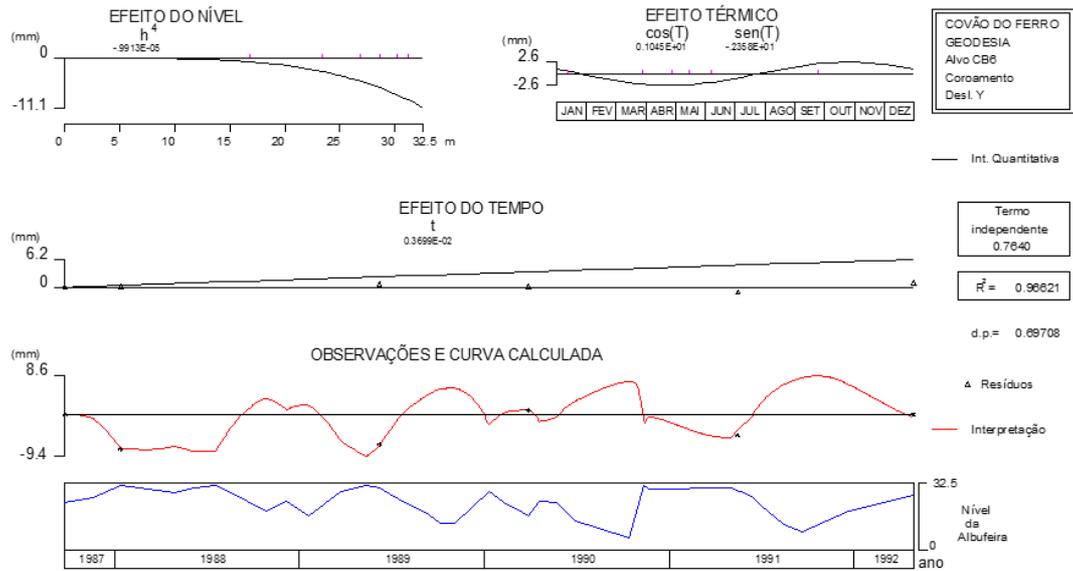
**Figura II.19 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N6 do coroamento, entre 1998 e 2016.**



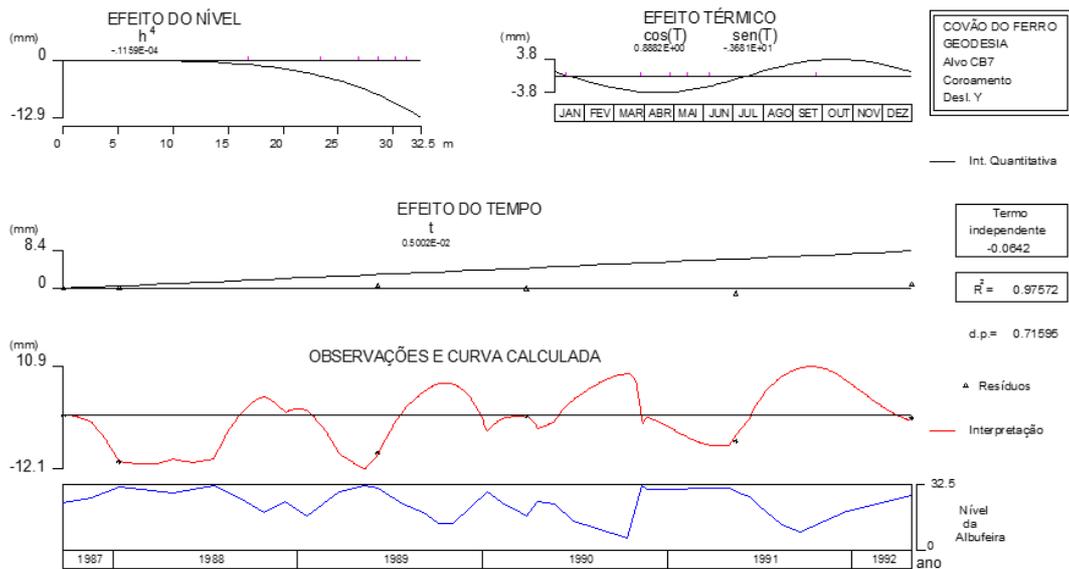
**Figura II.20 - Barragem de Freigil. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto N8 do coroamento, entre 1998 e 2016.**



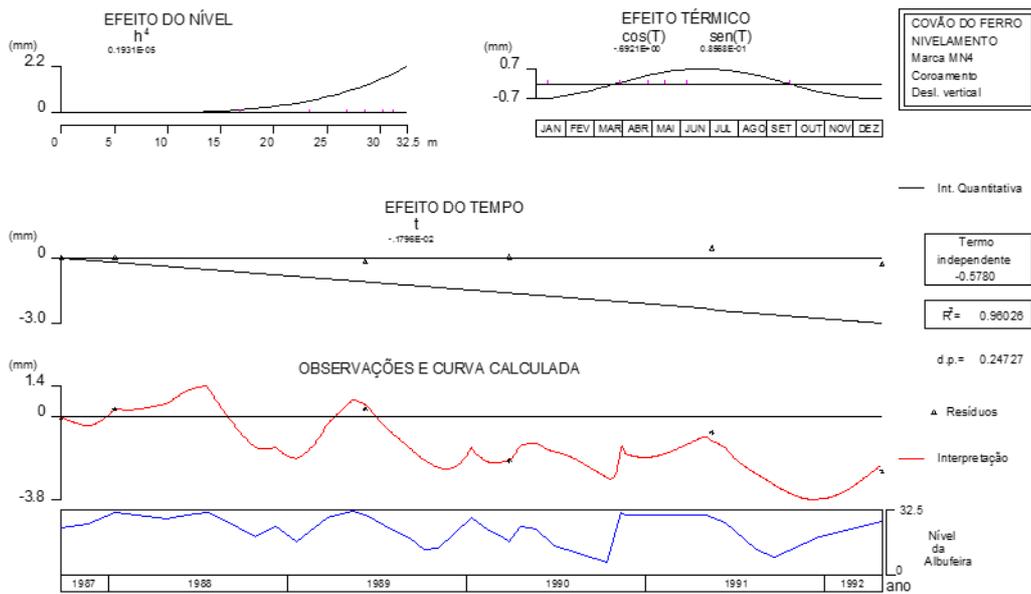
**Figura II.21 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB4/5 do coroamento, entre 1987 e 1992**



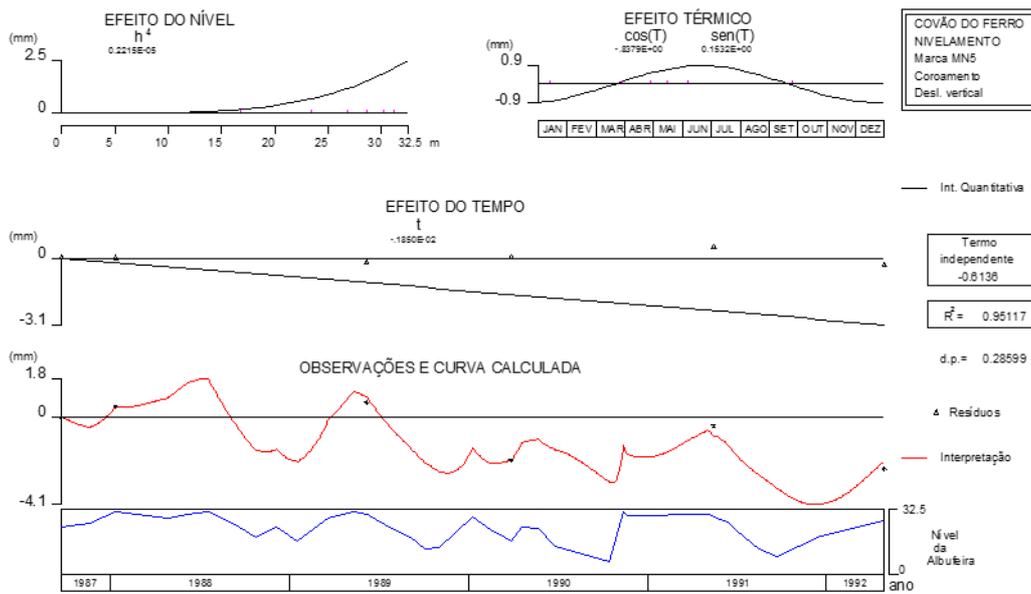
**Figura II.22 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB6 do coroamento, entre 1987 e 1992**



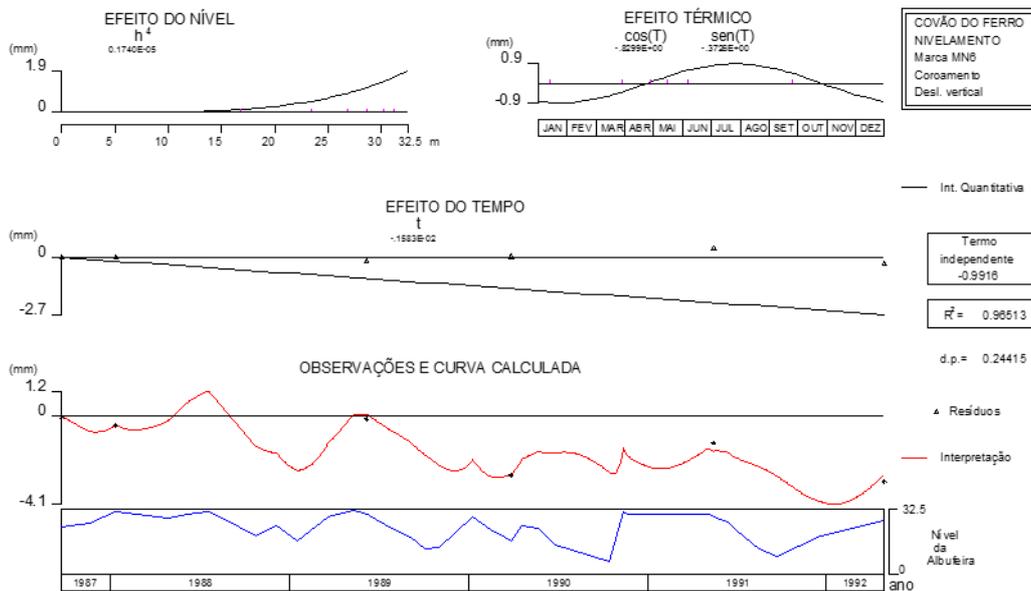
**Figura II.23 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos na direção Y observados por triangulação geodésica no alvo CB7 do coroamento, entre 1987 e 1992**



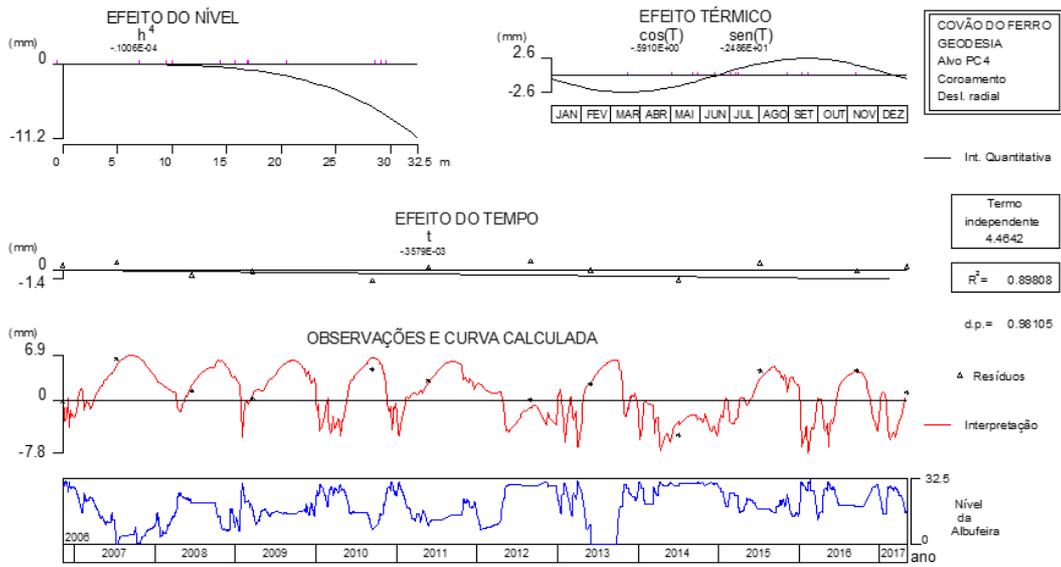
**Figura II.24 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN4 do coroamento, entre 1987 e 1992**



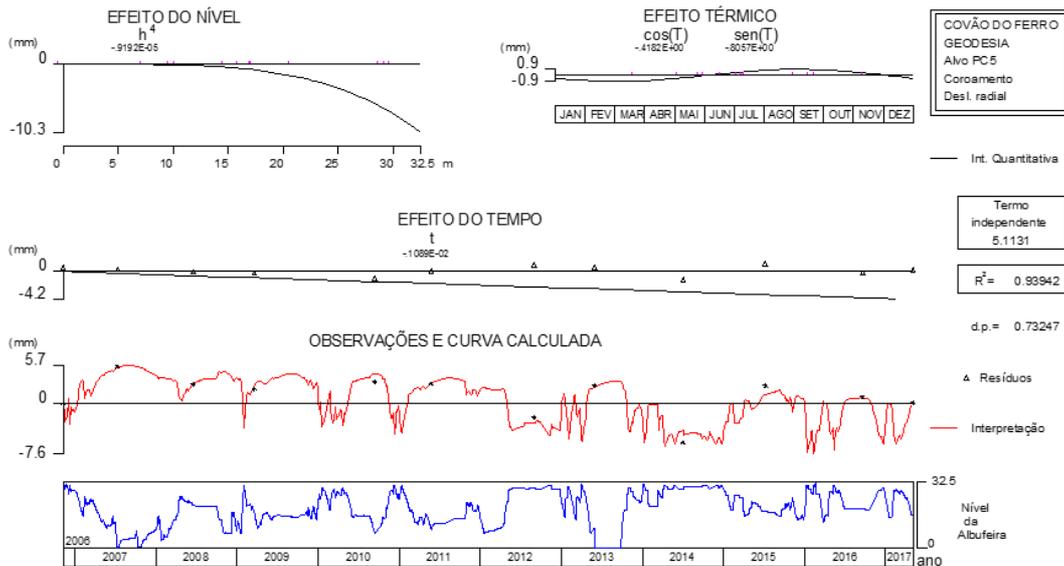
**Figura II.25 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN5 do coroamento, entre 1987 e 1992**



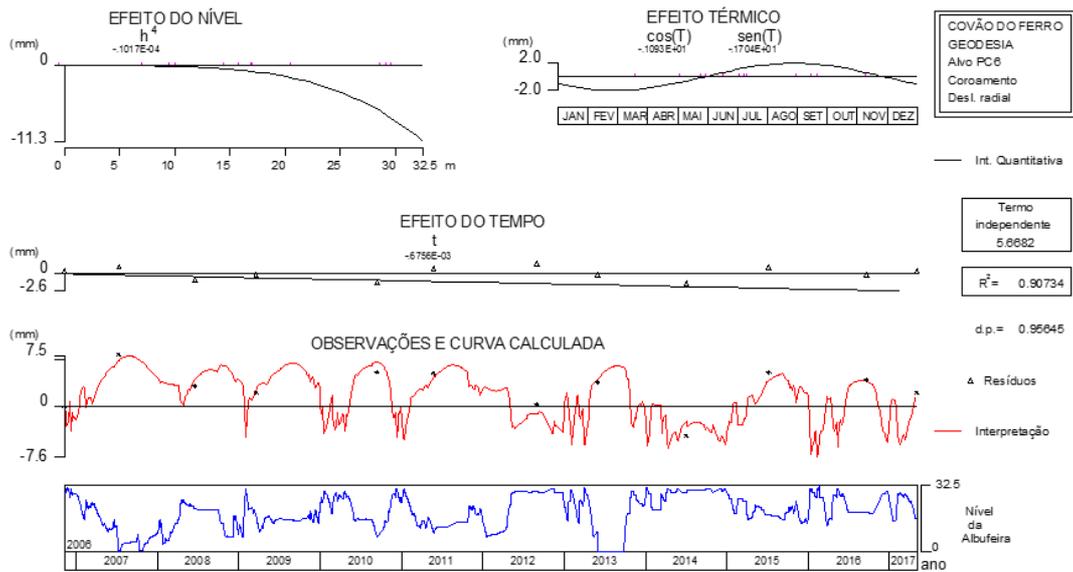
**Figura II.26 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento geométrico na marca MN6 do coroamento, entre 1987 e 1992**



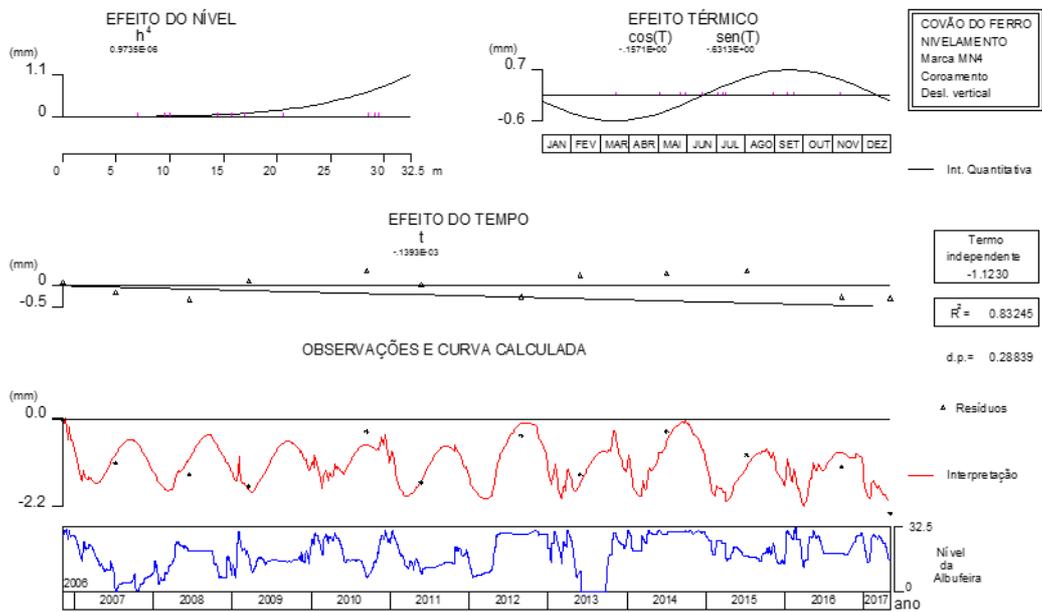
**Figura II.27 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC4 do coroaento, entre 2006 e 2017.**



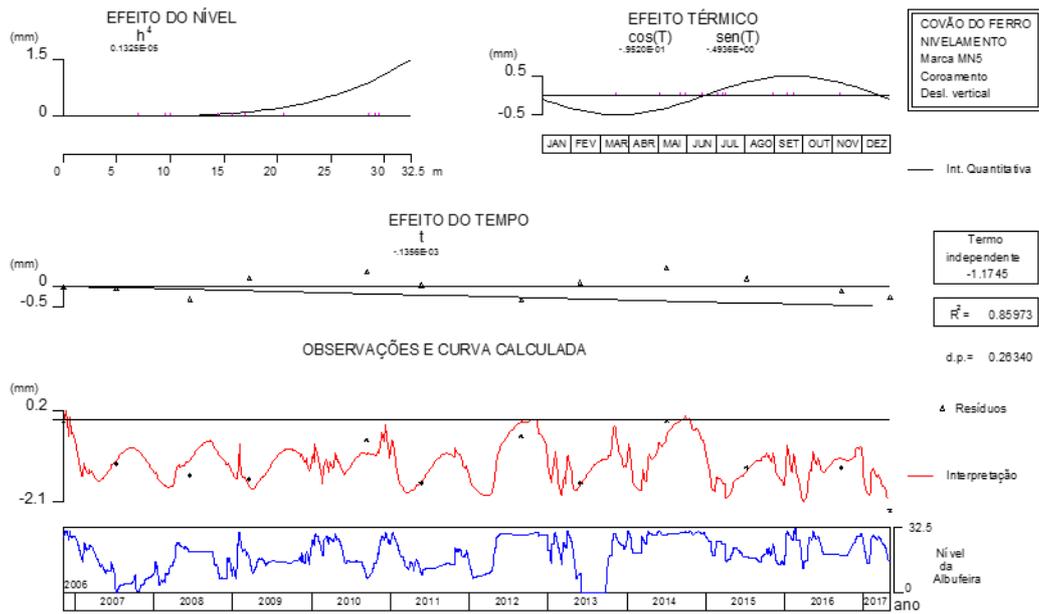
**Figura II.28 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC5 do coroaento, entre 2006 e 2017.**



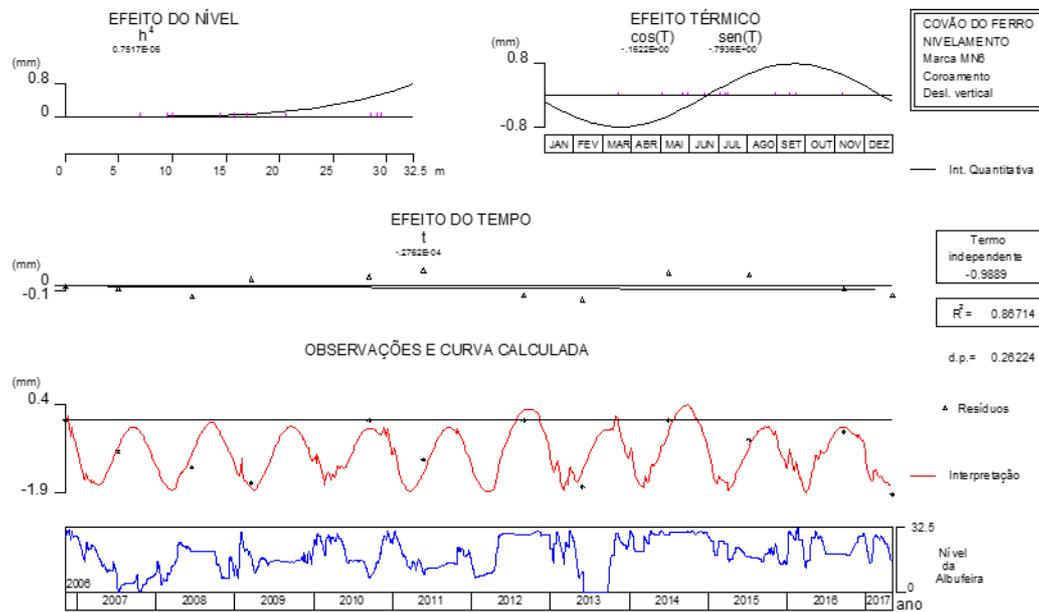
**Figura II.29 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais observados por triangulação geodésica no ponto PC6 do coroamento, entre 2006 e 2017.**



**Figura II.30 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN4 do coroamento, entre 2006 e 2017.**



**Figura II.31 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN5 do coroamento, entre 2006 e 2017.**



**Figura II.32 - Barragem do Covão do Ferro. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados por nivelamento no ponto MN6 do coroamento, entre 2006 e 2017.**