

**OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO AO
LONGO DO TEMPO TENDO EM CONTA O EFEITO DE AÇÕES EXPANSIVAS**
Utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos

MARIANA SALLES DA SILVA SIMARRO
(Licenciada em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o ISEL e o LNEC

Orientador:

Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira (LNEC/ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina Ferreira Xavier Brito Machado, Prof.^a Coordenadora (ISEL)

Vogais:

Doutor Nuno Miguel Monteiro Azevedo, (LNEC)

Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira, Eq. Prof. Adjunto (LNEC/ISEL)

Dezembro de 2017

Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil a possibilidade de realizar o trabalho final de mestrado no Departamento de Barragens de Betão (Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas).

Agradeço à Engenheira Noémi Leitão e ao Engenheiro José Piteira Gomes pelo apoio prestado nos cálculos térmico e higrométrico e no cálculo das ações expansivas.

Obrigada ao Professor Sérgio Oliveira pela disponibilidade ao aceitar-me como sua orientanda, pelas horas despendidas a ensinar, explicar e aconselhar sempre com paciência e entusiasmo durante estes meses.

Agradeço também aos meus colegas do LNEC, Renato Pereira, Margarida Espada, Matilde Freitas, Glória Mendonça e Miguel Rodrigues pela boa disposição durante estes meses.

Gostaria de agradecer também à Ana Gomes, ao Rui Duarte e ao Guilherme Garcia pelas horas de estudo, trabalho e companhia durante o mestrado.

Obrigada ao Rafael Ramos, ao André Alegre e ao Rodrigo Morais pela ajuda, troca de ideias e companhia durante a elaboração deste trabalho.

Para terminar, um muito obrigada à minha família, em especial à minha irmã Susana por todas as sugestões dadas e incentivo, ao meu pai por todo conhecimento transmitido e à minha mãe por toda a paciência e apoio.

OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO AO LONGO DO TEMPO TENDO EM CONTA O EFEITO DE AÇÕES EXPANSIVAS. UTILIZAÇÃO INTEGRADA DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS E DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS

Resumo

O controlo da segurança de barragens baseia-se na monitorização da resposta das obras ao longo do tempo e na comparação entre resultados observados e resultados previstos através de modelos numéricos. Em geral os resultados observados analisam-se com base em modelos de separação de efeitos (MSE), o que facilita a comparação com resultados de modelos de elementos finitos (MEF).

Com esta dissertação pretende-se contribuir para o desenvolvimento das metodologias de análise do comportamento de barragens de betão em fase de exploração normal, em particular de barragens com problemas de expansões. Nomeadamente é objetivo deste trabalho contribuir para melhorar o programa **DamSafe3.0** para apoio à análise dos dados da observação de barragens recorrendo à utilização integrada de MEF e de MSE. O programa **DamSafe3.0**, desenvolvido em MATLAB, inclui um módulo de análise estrutural com elementos finitos (MEF) e um módulo para análise dos resultados observados por separação de efeitos (MSE). O programa está estruturado para facilitar a comparação gráfica entre resultados de MEF e de MSE.

Como exemplo de aplicação considera-se o caso da barragem da Aguieira, uma barragem de três abóbadas, com cerca de 90 m de altura que entrou em serviço no início da década de 80. Analisa-se o comportamento estrutural da barragem ao longo do tempo na perspetiva de caracterizar o efeito estrutural da expansão do betão, que foi identificada na última década.

Os deslocamentos observados com fios de prumo e por métodos geodésicos (planimetria e nivelamento), nas três abóbadas e nos contrafortes, são analisados com base em MSE desenvolvidos especificamente no âmbito desta dissertação e incluídos no módulo MSE do programa **DamSafe3.0**. Estes MSE estão preparados para recorrer a informação proveniente de MEF e permitem separar os efeitos do tempo em várias parcelas, nomeadamente, em duas parcelas de fluência (o programa permite considerar diferentes coeficientes de fluência na lei de Bazant e Panula, adaptados a betões com ou sem dano), uma associada à pressão hidrostática e outra ao peso próprio, e numa parcela associada a expansões. Utilizam-se funções exponenciais para simular o efeito elástico do nível da água e funções do tipo sigmoide para simular a evolução das expansões ao longo do tempo. O efeito da temperatura é simulado com base em temperaturas observadas. Os diferentes efeitos obtidos nos vários pontos observados com o MSE, são comparados com os correspondentes efeitos determinados numericamente com o MEF, em termos de linhas de influência e de deformadas globais, com especial ênfase na parcela correspondente ao efeito das expansões em termos de deslocamentos verticais e horizontais.

MONITORING AND ANALYSIS OF CONCRETE DAMS' BEHAVIOR OVER TIME CONSIDERING SWELLING EFFECTS. INTEGRATED USE OF FINITE ELEMENT MODELS AND MODELS FOR EFFECTS SEPARATION

Abstract

The safety control of dams is based on the structural response monitoring across time and on the comparison between observed and predicted results, with the latter ones obtained by numerical models. The observed results are mostly analyzed through effect separation models (ESM), to compare the referred results with those from the finite elements numerical models (FEM).

This thesis contribution is centered in the development of methodologies to analyze the concrete dams' behavior at an operational phase, particularly when concerning dams with swelling problems. This thesis contributes for the upgrade of **DamSafe3.0**, which is a program to support the dams' observation data analysis resorting to the integrated use of FEM and ESM. **DamSafe3.0** was developed in MATLAB and is composed by a FE module for the structural analysis and a ES module for the analysis of the observed results. The program structure enables an easier graphical comparison between the FEM and ESM results.

Agueira dam was considered as the case study. This dam is a multiple arch dam of 90 m high with three arches and two counterforts. Agueira dam first filling was in the early 80's.

The structural dam behavior is analyzed across time because the concrete swelling behavior needs to be characterized since it was identified in the last decade.

The observed displacements measured with plumb lines and geodetic methods (leveling and planimetric), at the three arches and at the counterforts, are analyzed with ESM developed specifically within this thesis scope and included in **DamSafe3.0** ESM module. This ESM module is prepared to retrieve information from FEM and is able to separate the time effects into individual parts, namely: into two creep components (the program can consider different creep laws from Bazant and Panula, adapted to concretes with and without damage), one related to the hydrostatic pressure and the other one to the self-weight; and into a third component related to the swelling reaction. Additionally, exponential functions are used to simulate the water level elastic effect and sigmoid functions are used to simulate the swelling evolution across time. The temperature component is simulated based on observed temperatures. The different components obtained by the ESM, at various observation points, are compared with the corresponding components determined by the FEM, in terms of influence lines and global deformed shape, with special emphasis on the swelling component effect on the vertical and horizontal displacements.

PALAVRAS-CHAVE / KEYWORDS

Barragens de betão / Concrete dams

Modelos de separação de efeitos / Effects separation models

Modelos numéricos de elementos finitos / Numerical finite element models

Comportamento observado ao longo do tempo / Observed behavior over time

Expansão do betão / Concrete swelling

Índice

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Justificação e enquadramento do tema.....	2
1.3 Objetivos da Dissertação.....	6
1.4 Estrutura do Trabalho.....	11
2 MODELOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS.....	13
2.1 Generalidades.....	13
2.2 Controlo da segurança e observação de barragens.....	14
2.2.1 Observação das ações e da resposta.....	15
2.2.2 Observação de obras sujeitas a expansões.....	17
2.2.3 Observação de movimentos de junta.....	18
2.3 Modelos Numéricos de elementos finitos.....	20
2.4 Modelos de separação de efeitos (MSE).....	25
2.4.1 Fundamentos dos MSE.....	25
2.4.2 Análise dos efeitos associados às principais ações em barragens.....	28
2.5 Considerações Finais.....	39
3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DA AGUIEIRA. RESULTADOS PREVISTOS ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS DE ELEMENTOS FINITOS.....	41
3.1 Considerações Iniciais.....	41
3.1.1 Localização.....	42
3.1.2 Geometria e características.....	42
3.1.3 Modelo de elementos finitos desenvolvido.....	45
3.1.4 Principais ações.....	46
3.1.5 Características do betão, respetivas curvas de fluência e coeficientes de fluência.....	52
3.2 Resultados do MEF.....	54
3.2.1 Ação do Peso Próprio.....	54
3.2.2 Ação da Pressão Hidrostática.....	58
3.2.3 Ação das Expansões.....	62

3.2.4	Ação da combinação PP+PH+Expansões	66
3.3	Considerações finais.....	70
4UTILIZAÇÃO INTEGRADA DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS E DE		
MODELOS DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA		
DAMSAFE3.0, DESENVOLVIDO EM MATLAB.....		
71		
4.1	Considerações iniciais	71
4.2	Organização do programa	72
4.2.1	Programa DamSafe3.0. Módulo MEF	74
4.2.2	Programa DamSafe3.0. Módulo MSE	77
4.3	Considerações finais.....	80
5ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA		
BARRAGEM DA AGUIEIRA. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE MEF E MSE ..		
81		
5.1	Considerações Iniciais.....	81
5.2	Aparelhos de observação.....	83
5.3	Análise de deslocamentos radiais medidos por geodesia	86
5.3.1	Ponto no centro da abóbada central, à cota 122 m: ponto C122	86
5.3.2	Ponto no centro da abóbada direita, à cota 122 m: ponto D122	87
5.3.3	Ponto no centro da abóbada esquerda, à cota 122 m: marca geodésica E122	88
5.3.4	Ponto na secção central da abóbada central, à cota 87 m: marca geodésica 3C87.....	89
5.3.5	Ponto na secção central da abóbada central, à cota 57 m: marca geodésica C57.....	89
5.4	Análise de deslocamentos radiais medidos por fio de prumo	97
5.4.1	Fio de prumo FPI6. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada direita, junto à cabeça do contraforte	97
5.4.2	Fio de prumo FPI5. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada esquerda, junto à cabeça do contraforte	98
5.4.3	Fio de prumo FPI4. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada central no lado direito, junto à cabeça do contraforte.....	99
5.4.4	Fio de prumo FPI3. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada central no lado esquerdo, junto à cabeça do contraforte.....	100
5.5	Análise de deslocamentos verticais medidos por nivelamento	107
5.5.1	Ponto no meio da abóbada central, à cota 123,5 m: ponto N12.....	107
5.5.2	Ponto no contraforte direito, à cota 123,5 m: ponto N14	108
5.5.3	Ponto no contraforte esquerdo, à cota 123,5 m: ponto N10	109
5.5.4	Ponto no meio da abóbada direita, à cota 123,5 m: ponto N16	109

5.5.5	Ponto no meio da abóbada esquerda, à cota 123,5 m: ponto N8	110
5.6	Comparação de resultados MEF/MSE para cada um dos efeitos	117
5.6.1	Efeito elástico do nível	117
5.6.2	Efeito da temperatura.....	120
5.6.3	Efeitos das expansões	123
5.7	Considerações finais.....	126
6	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	127
6.1	Síntese do trabalho e apreciação dos resultados.....	127
6.2	Desenvolvimentos Futuros	128
BIBLIOGRAFIA	131

Simbologia

Latinas maiúsculas

\underline{B}	Matriz com as derivadas das funções de interpolação
\underline{D}	Matriz de elasticidade
$D_{máx}$	Diâmetro máximo dos agregados
E	Módulo de elasticidade
$E(t)$	Evolução do módulo de elasticidade
E_{MEF}	Módulo de elasticidade adotado no MEF
E_0	Parâmetro dependente das características intrínsecas do betão
\underline{F}^e	Vetor das forças nodais do elemento
G	Módulo de distorção
\underline{I}	Matriz identidade
$J(t, t_0)$	Função de fluência
\underline{K}^e	Matriz de rigidez elementar
K_V	Módulo de deformabilidade volumétrica
\underline{L}	Operador diferencial
N_i	Funções de interpolação polinomiais
P	Ponto P interior da estrutura
T_{ar}	Temperatura do ar
W_{ext}	Trabalho das forças exteriores
W_{int}	Trabalho das forças interiores

Latinas minúsculas

a	Coefficiente da parcela do efeito elástico e de fluência do nível
a_s	Vetor de aceleração sísmica
b	Coefficiente da parcela do efeito da temperatura
c	Coefficiente da parcela dos efeitos do tempo (Expansões)
c_f	Coefficiente de forma

c_α	Coeficiente de amortecimento
d	Coeficiente da parcela do efeito dos movimentos da fundação
\underline{f}	Vetor das forças mássicas
\underline{f}^e	Vetor das forças mássicas elementar
g	Aceleração da gravidade
\underline{g}	Vetor da aceleração da gravidade
h	Cota de água
k	Termo independente
m	Massa especifica
m	Parâmetro dependente das características intrínsecas do betão
n	Parâmetro dependente das características intrínsecas do betão
\vec{n}	Versor da normal a uma superfície
t	Tempo
\bar{t}	Época do ano
t_{hs}	Tempo até atingir metade do valor das expansões (h-half; s-swelling)
$u(h, t, \bar{t})$	Deslocamento global
\underline{u}	Vetor de deslocamentos
$\dot{\underline{u}}$	Vetor de velocidades
$\ddot{\underline{u}}$	Vetor de acelerações
u_e	Parcela elástica do deslocamento devido ao peso próprio
\underline{u}^e	Vetor de deslocamentos de cada nó
u_{exp}	Deslocamento do efeito do tempo (Expansões)
u_e^{PH}	Deslocamento do efeito elástico do nível
u_e^{PP}	Deslocamento do efeito elástico do peso próprio
u_{eMEF}^{PP}	Deslocamento elástico do peso próprio calculado pelo MEF
u_e^{VT}	Deslocamento do efeito elástico da temperatura
u_F	Parcela de fluência do deslocamento devido ao peso próprio
u_F^{PH}	Deslocamento do efeito de fluência do nível
u_F^{PP}	Deslocamento do efeito de fluência do peso próprio

u_{fund}	Deslocamento do efeito dos movimentos da fundação
$u_{obs(N)}$	Deslocamento observado em cada época
u_{Radial}	Deslocamento radial
x_1, x_2, x_3	Eixos

Gregas minúsculas

β	Parâmetro dependente das características intrínsecas do betão
ξ	Vetor das deformações
$\phi(t, t_0)$	Coefficiente de fluência
φ_1	Parâmetro dependente das características intrínsecas do betão
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Vetor das tensões

Acrónimos

EET	Efeito Elástico da Temperatura
EEN	Efeito Elástico do Nível
EF	Elementos Finitos
EF3D	Elementos Finitos 3D
GL	Grau de Liberdade
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
LFCV	Lema Fundamental do Cálculo Variacional
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos/ Modelo de Elementos Finitos
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MSE	Método de Separação de Efeitos/Modelo de Separação de Efeitos
NMC	Nível de Máxima Cheia
NMMR	Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas
PH	Pressão Hidrostática

PP	Peso Próprio
RAS	Reação Álcalis-Sílica
VT	Varição de Temperatura

1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Em face das alterações climáticas que, entre outros efeitos, provocam períodos de seca mais longos e com maior frequência, as barragens têm cada vez maior importância para a nossa sociedade, sobretudo porque são fundamentais para a constituição de reservatórios de água doce, para rega e abastecimento das populações, mas também para a produção de energia renovável e ainda para o controlo de cheias (CNPGB, 1992). Com todas estas funcionalidades considera-se de todo o interesse prolongar ao máximo a vida útil deste tipo de obras, geralmente classificadas como de grande complexidade em termos de conceção e execução, mas também de monitorização e observação. Devido ao facto de, em geral, envolverem elevados riscos potenciais devido à existência de populações a jusante, as barragens são obras que requerem uma monitorização cuidada e rigorosa, de forma contínua, para que se possa estudar, analisar e prevenir eventuais acidentes/incidentes. É por isso que existe uma constante observação, análise, controlo e monitorização do comportamento de barragens de betão ao longo da sua vida útil, para que seja garantida a segurança estrutural das barragens e de toda a envolvente. Esse controlo da segurança das barragens é conseguido recorrendo a vários tipos de aparelhos de observação cujos dados são analisados com base em aplicações computacionais (*software*) cada vez mais sofisticadas, que levam a uma monitorização cada vez mais moderna e mais rigorosa.

Assim, para que seja realizado um controlo da segurança mais correto e adequado, existem vários aparelhos de observação para a instrumentação das barragens que registam o comportamento ao longo do tempo.

1.2 Justificação e enquadramento do tema

No controlo da segurança de barragens de betão é fundamental desenvolver aplicações computacionais que facilitem a análise da resposta observada ao longo do tempo (Figura 1.1) e a comparação entre as observações e os resultados previstos através de modelos, podendo utilizar-se:

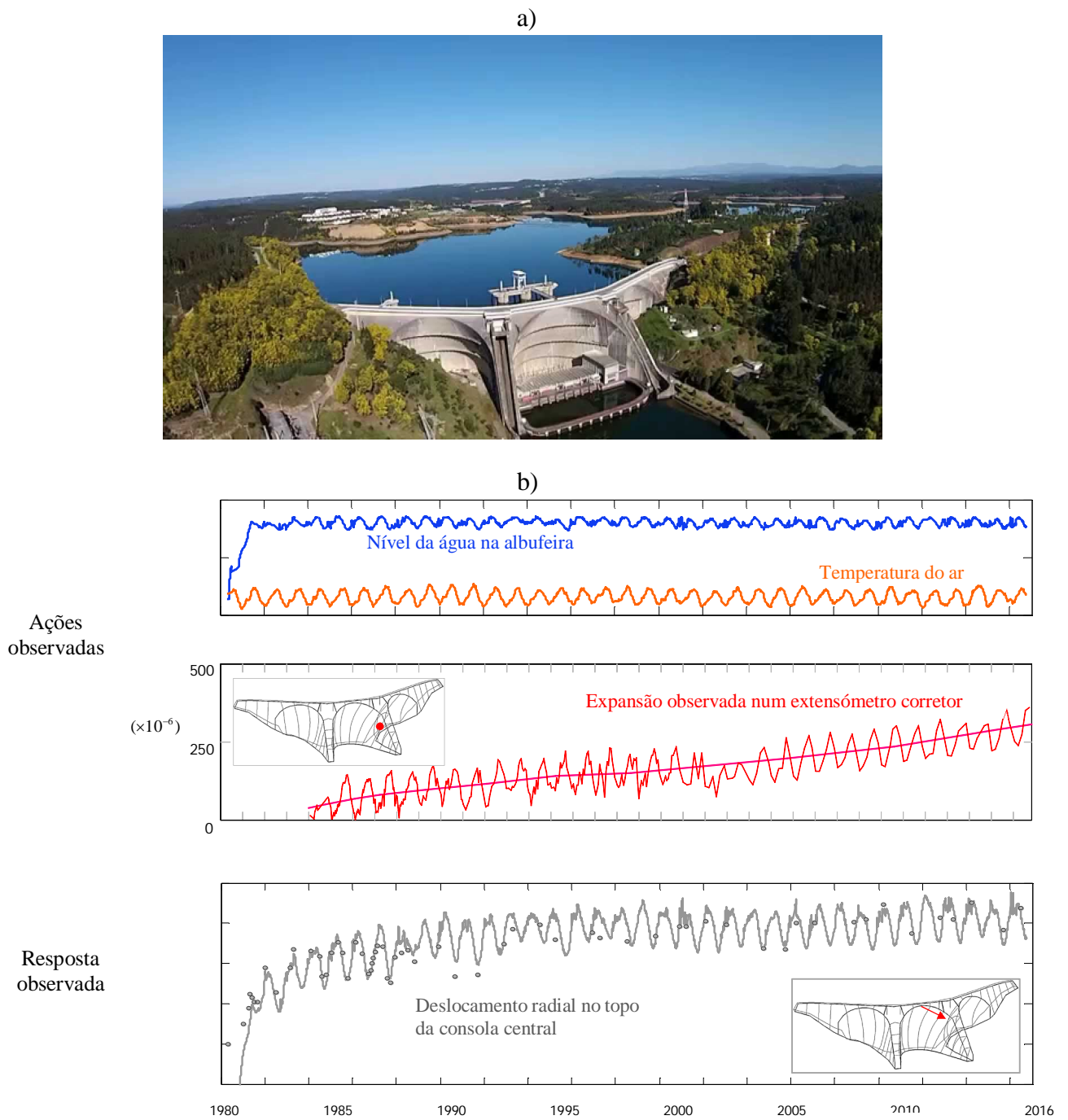
- i) modelos numéricos de elementos finitos (MEF), Figura 1.2, baseados nos princípios físicos da mecânica estrutural;
- ii) modelos de carácter puramente estatístico, elaborados sem recorrer a quaisquer princípios físicos (p.ex. redes neuronais (Mata, 2007) (Salazar, 2017), “treinadas” para identificar padrões do comportamento observado, os quais, posteriormente, poderão ser adotados para estimar o comportamento futuro); e
- iii) modelos semi-estatísticos também designados por modelos de separação de efeitos (MSE), Figura 1.3, elaborados tendo em conta alguns princípios físicos básicos que se usam na escolha da denominada “função do modelo”, correspondente a uma soma de funções matemáticas simples representativas dos efeitos das principais ações (funções da cota de água h , da temperatura T , da idade da obra t , etc.), as quais são dependentes de parâmetros que se calculam através de uma regressão linear múltipla por forma a que a “função do modelo” se ajuste da melhor forma à história dos resultados observados.

Quanto aos MEF é de salientar que se trata de modelos que permitem simular o comportamento das obras em qualquer fase da sua vida, inclusivamente na fase de projeto e na fase de primeiro enchimento, quando ainda não existem resultados observados. Por outro lado, os modelos estatísticos ou os modelos semi-estatísticos de separação de efeitos (MSE), só podem ser usados na fase de exploração normal das obras quando já existem registos de observação em períodos de tempo relativamente longos, que envolvam variações bem representativas das várias solicitações.

Assim a principal diferença a assinalar entre os MEF e os MSE, ambos abordados na presente dissertação, é que os MEF são baseados na resolução numérica das equações fundamentais da mecânica estrutural, sendo, por isso, verdadeiros modelos de previsão, enquanto os MSE são menos gerais, podendo ser classificados como modelos de identificação de padrões nos registos referentes ao comportamento anteriormente observado, apresentando, contudo, a grande vantagem de possibilitarem a análise da resposta observada por separação de efeitos, o que é fundamental para se atingir uma boa compreensão da resposta global das obras.

De facto, na fase de análise e interpretação dos dados da observação é da maior conveniência utilizar os referidos MSE com vista, essencialmente, a estudar a parcela referente aos efeitos do tempo a qual é fundamental para a caracterização e deteção atempada de eventuais patologias como, por exemplo, processos de deterioração evolutiva associados a expansões do betão. Desta forma será

possível intervir preventivamente projetando e executando atempadamente eventuais intervenções de manutenção/reabilitação que se considerem necessárias.



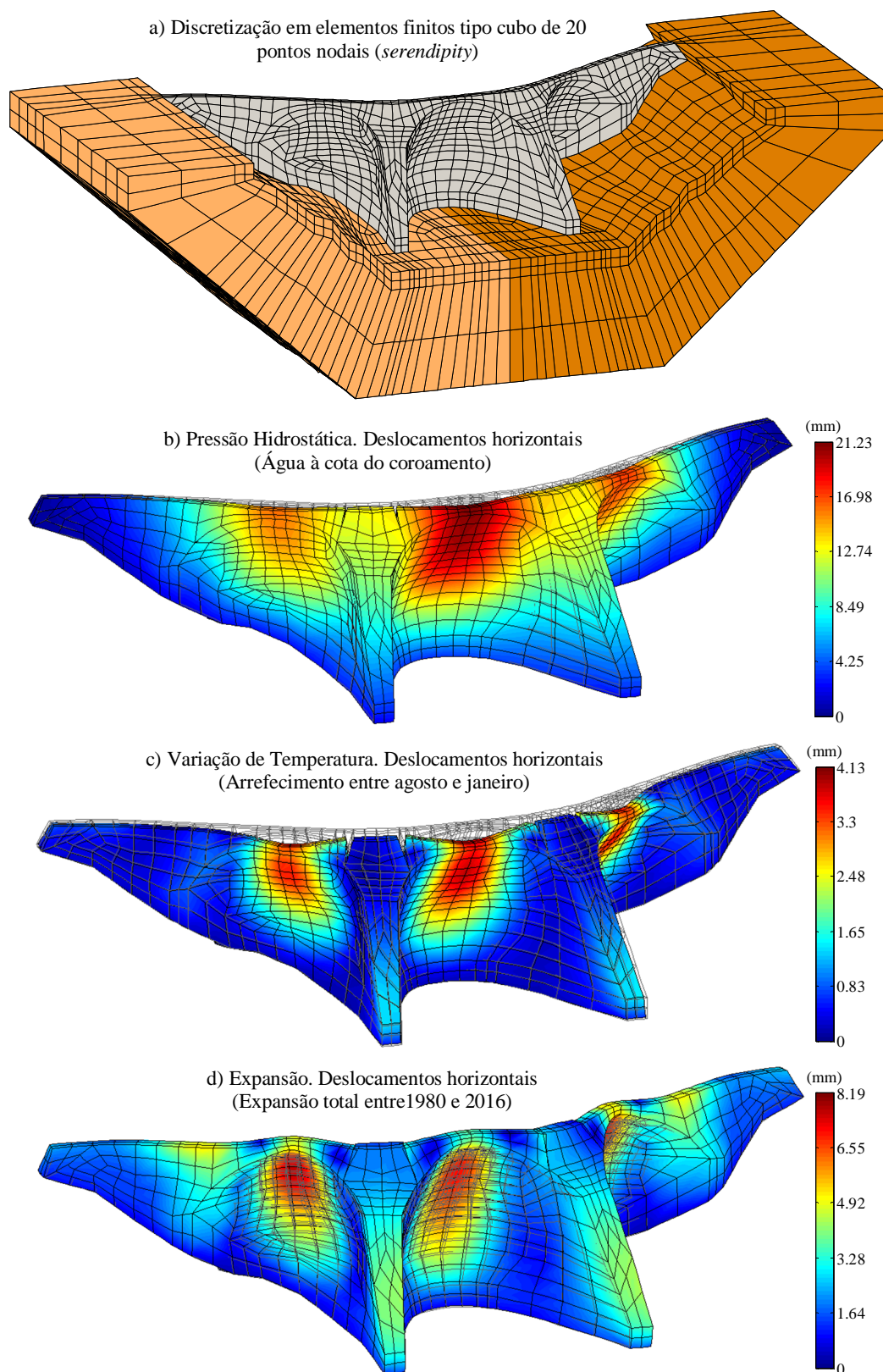
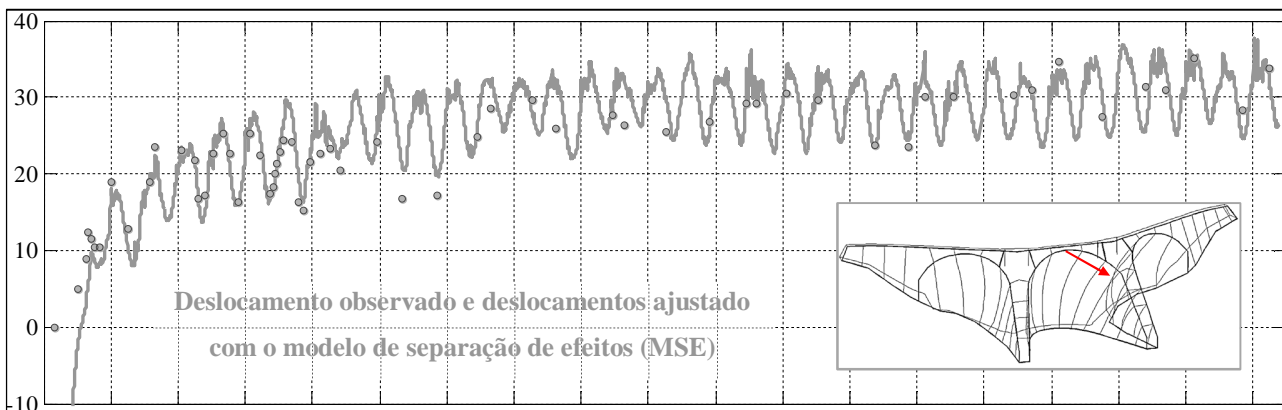
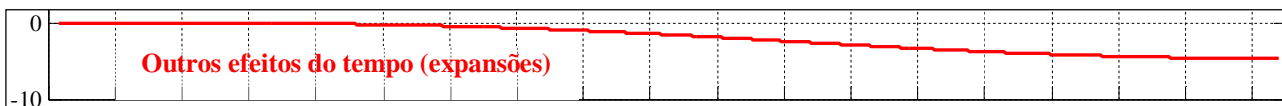
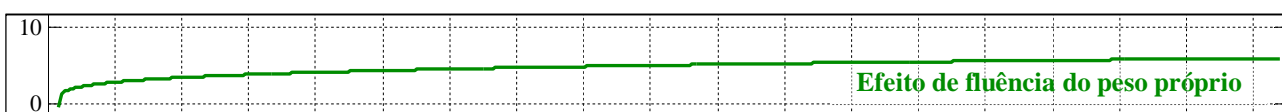
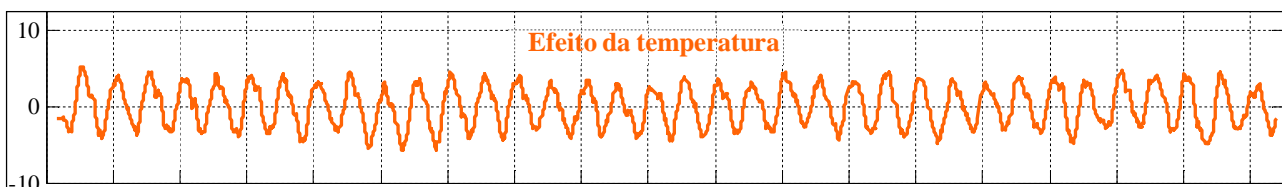
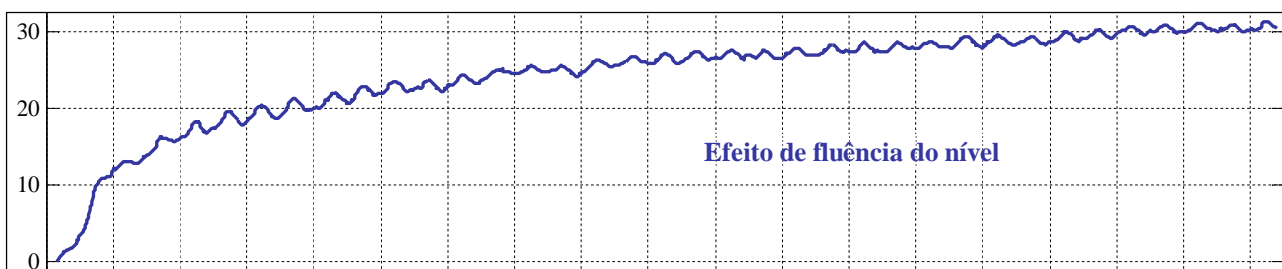
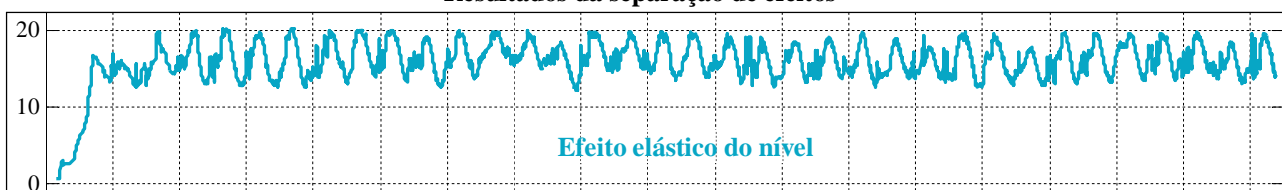


Figura 1.2 - Modelo de elementos finitos. a) Discretização adotada (obtida a partir de uma malha larga pré-existente recorrendo ao programa de refinamento automático **Mesh3DRefin1.0** desenvolvido em MATLAB no âmbito desta dissertação); b) Deslocamentos devidos à pressão hidrostática (água à cota do coroamento); c) Deslocamentos devidos a uma variação de temperatura correspondente a uma arrefecimento entre agosto e janeiro; d) Deslocamentos devidos à expansão total acumulada entre 1980 e 2016 (a expansão é estimada com base num modelo material para simulação dos efeitos macroscópicos dos processos expansivos, através de determinação das expansões livres em função das propriedades reativas do betão e das histórias térmica e higrométrica (Gomes J. P., 2007)).



Resultados da separação de efeitos



1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016

Figura 1.3 - Modelo de separação de efeitos, aplicado à análise do deslocamento radial observado no topo da consola central (Geodesia). Modelo que permite a identificação da parcela dos efeitos do tempo associada às expansões, separando dos efeitos do tempo associados à fluência do peso próprio e à fluência da pressão hidrostática.

A questão que se aborda na presente dissertação é precisamente a do desenvolvimento de MSE eficientes que permitam separar da melhor forma os efeitos do tempo associados a patologias, os quais, como se compreende facilmente, são os efeitos que mais interessa estudar do ponto de vista do controlo da segurança das obras.

Em particular, neste trabalho salienta-se que para o desenvolvimento de MSE eficientes, é da maior conveniência a integração com resultados de MEF por forma a que seja possível confirmar a existência de um bom acordo entre os resultados de ambos os modelos, MSE e MEF. Nomeadamente é importante obter o referido bom acordo no que se refere aos efeitos elástico e viscoelástico (fluência) do nível e ao efeito elástico da temperatura. Desta forma melhora a possibilidade de se obter uma boa identificação de eventuais efeitos de tempo associados a patologias.

1.3 Objetivos da Dissertação

O principal objetivo desta dissertação é contribuir para o desenvolvimento das metodologias de análise do comportamento de barragens de betão em fase de exploração normal, em particular de barragens com problemas de deterioração evolutiva como é o caso, por exemplo, das obras com problemas de expansões. Nomeadamente é objetivo deste trabalho contribuir para melhorar o programa **DamSafe3.0** para apoio à análise dos dados da observação de barragens recorrendo à utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos (Figura 1.4). O programa **DamSafe3.0**, desenvolvido em MATLAB, inclui dois módulos: um módulo de cálculo estrutural com elementos finitos (MEF) e um módulo para análise por separação de efeitos (MSE), e está estruturado para facilitar a comparação gráfica de resultados de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos (Figura 1.5).

Em particular, ao nível do módulo de separação de efeitos pretende-se que o programa **DamSafe3.0** permita:

- i) Considerar somatórios de funções exponenciais do tipo $a_1(e^{h/k_1} - 1) + a_2(e^{h/k_2} - 1) + \dots$ para simular o efeito elástico do nível da água;
- ii) Calcular e fixar os parâmetros dos MSE (a_1, a_2, \dots) utilizando resultados de MEF, nomeadamente no que se refere às funções a adotar para simular o efeito elástico do nível;
- iii) Separar explicitamente a parcela do efeito de fluência associada à pressão hidrostática, recorrendo aos parâmetros da lei de fluência de Bazant e Panula estimados para o betão da obra em análise;

- iv) Utilizar estimativas para o efeito da fluência do peso próprio recorrendo à resposta elástica calculada pelo MEF e à função de fluência do betão da barragem;
- v) Considerar funções exponenciais do tipo $c(1 - e^{-t^n/\beta})$ para simular o efeito da ação expansiva;
- vi) Obter saídas gráficas que facilitem a análise da deformada global da obra para os diversos efeitos identificados, nomeadamente, saídas gráficas que permitam a análise comparativa das deformadas globais identificadas por separação de efeitos, MSE, e calculadas pelo MEF (Figura 1.6 e Figura 1.7).

Quanto ao módulo de elementos finitos do programa **DamSafe3.0** pretende-se que permita:

- i) Efetuar cálculos de sistemas barragem-fundação discretizados em elementos finitos tridimensionais (EF3D), isoparamétricos, tipo cubo de 20 nós (*serendipity*) para as principais ações, nomeadamente, peso próprio, pressão hidrostática, variações térmicas e expansões; neste ponto é de referir que a geração e refinamento de malhas de EF3D de 20 nós é um importante objetivo parcelar desta dissertação tendo em conta que na análise de barragens é necessário adotar malhas de elementos finitos relativamente refinadas com vista a obter bons resultados para a resposta às ações térmicas e às ações expansivas;
- ii) Efetuar cálculos para diferentes cotas de água com vista a obter o traçado de linhas de influência com base no MEF;
- iii) Efetuar cálculos da resposta estrutural considerando o valor da expansão total acumulada num dado período de tempo (valores do campo de expansões em todo o corpo da obra); este campo de expansões é estimado recorrendo aos valores observados nos extensómetros corretores para calibrar um modelo de simulação do processo expansivo no corpo da obra (Gomes J. P., 2007) tendo em conta a evolução ao longo da vida da obra dos campos térmico e higrométrico no corpo da barragem (calculados por elementos finitos (Leitão, 2012)) e a composição química dos componentes do betão (agregados e pasta de cimento), em termos das quantidades de álcalis e sílica (RAS, reações expansivas álcalis-sílica).

Por fim é ainda objetivo da presente dissertação analisar o comportamento estrutural da barragem da Aguieira utilizando o programa **DamSafe3.0**, ou seja, recorrendo à utilização integrada de um modelo de elementos finitos da barragem e da fundação e de modelos de separação de efeitos para analisar a história dos deslocamentos observados: com fios de prumo e por métodos geodésicos, planimetria e nivelamento. Em particular, com este caso de aplicação à barragem da Aguieira, pretende-se analisar o efeito ao longo do tempo da ação expansiva e mostrar que é possível usar os modelos de separação de efeitos implementados no **DamSafe3.0** para separar corretamente o efeito da ação expansiva, quer em termos das componentes de deslocamento horizontal quer em termos das

componentes de deslocamento vertical, as quais são comparadas com os resultados previstos numericamente com o modelo de elementos finitos desenvolvido.

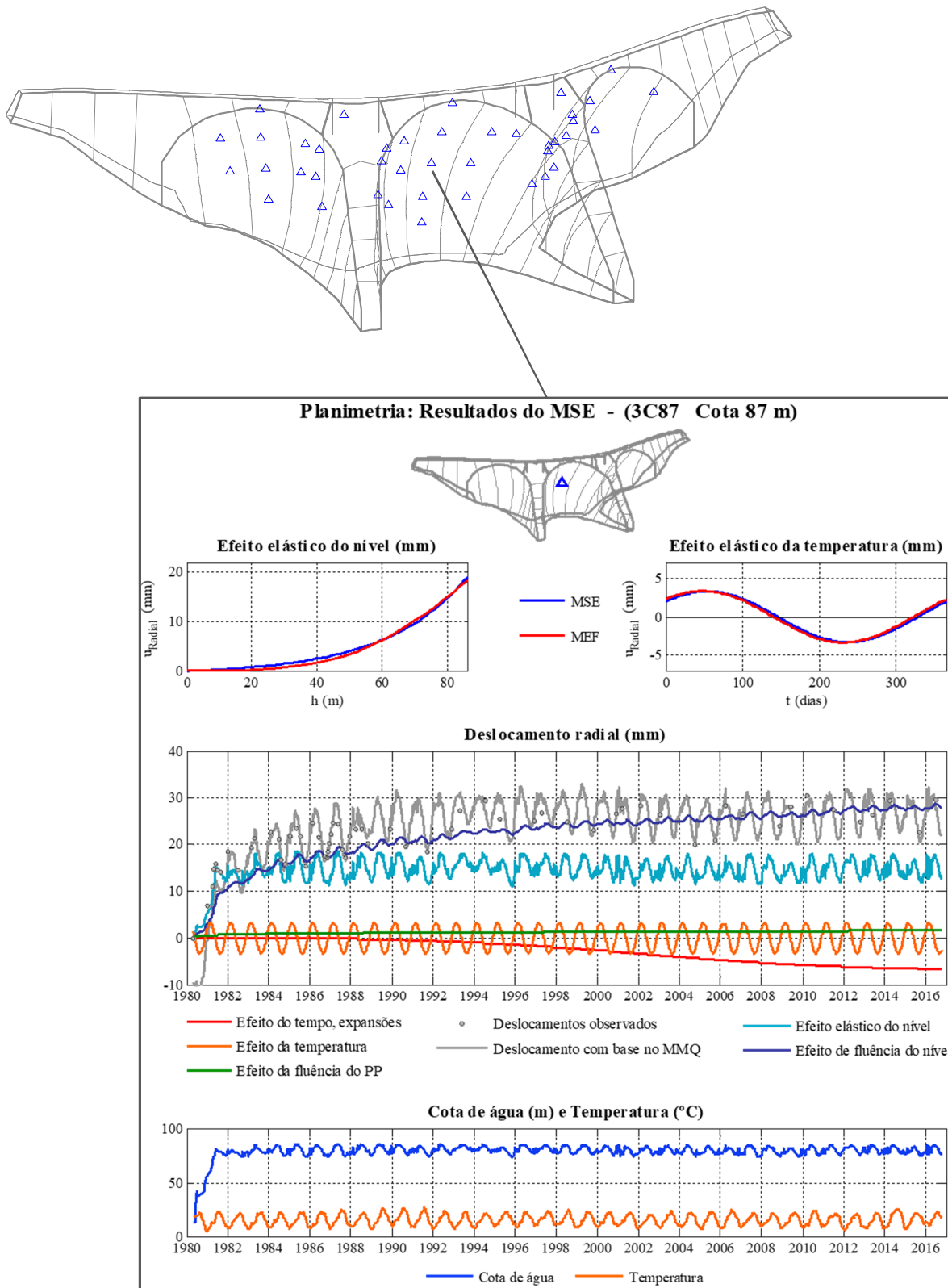


Figura 1.4 - Utilização do programa **DamSafe3.0** para análise da história do deslocamento radial observado por geodesia num ponto da consola central da barragem da Aguieira. Comparação de resultados obtidos com um modelo de separação de efeitos e de resultados numéricos obtidos com um modelo de EF3D.

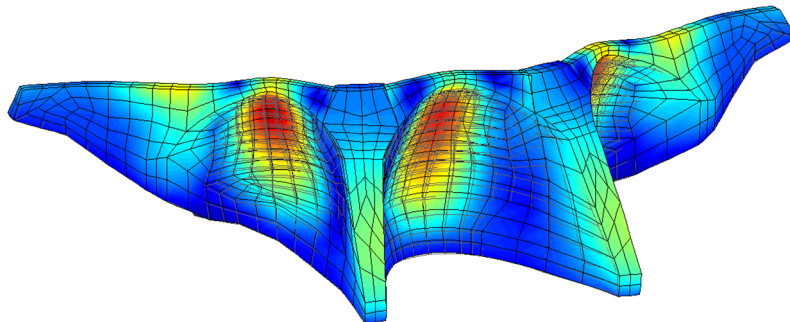
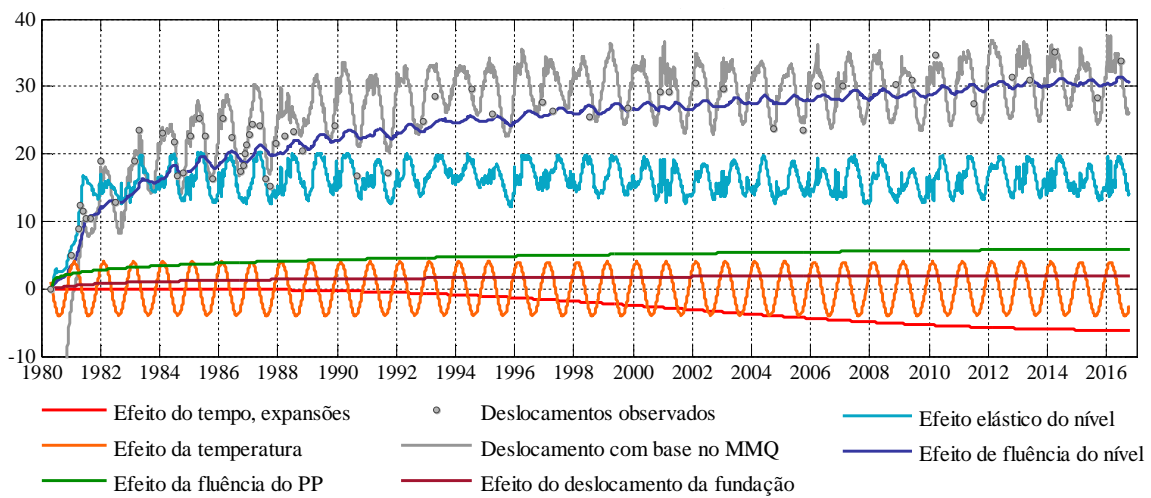
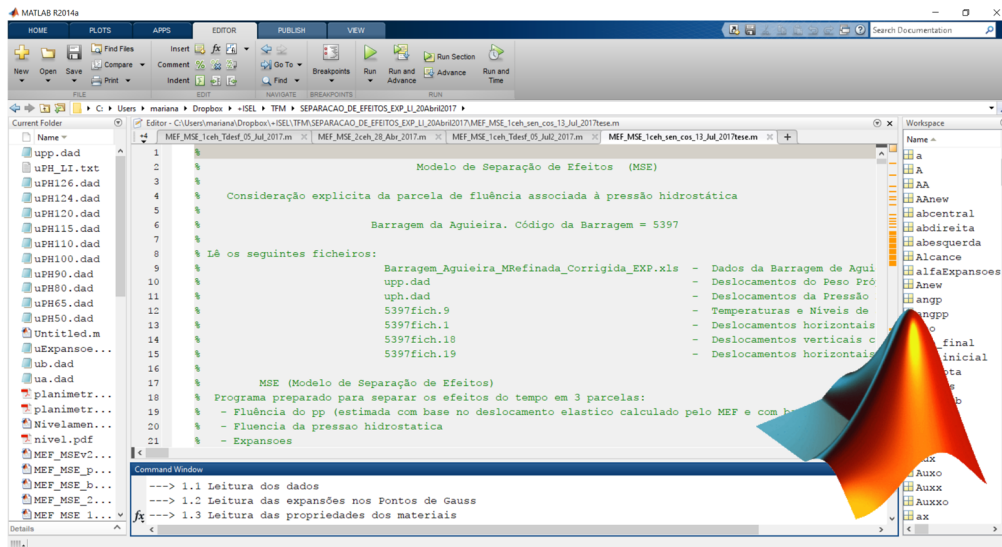


Figura 1.5 - Desenvolvimento de um programa em MATLAB para facilitar a utilização integrada de modelos de separação de efeitos (MSE) e de modelos de elementos finitos (MEF) com vista ao controlo de segurança de barragens: programa **DamSafe3.0**.

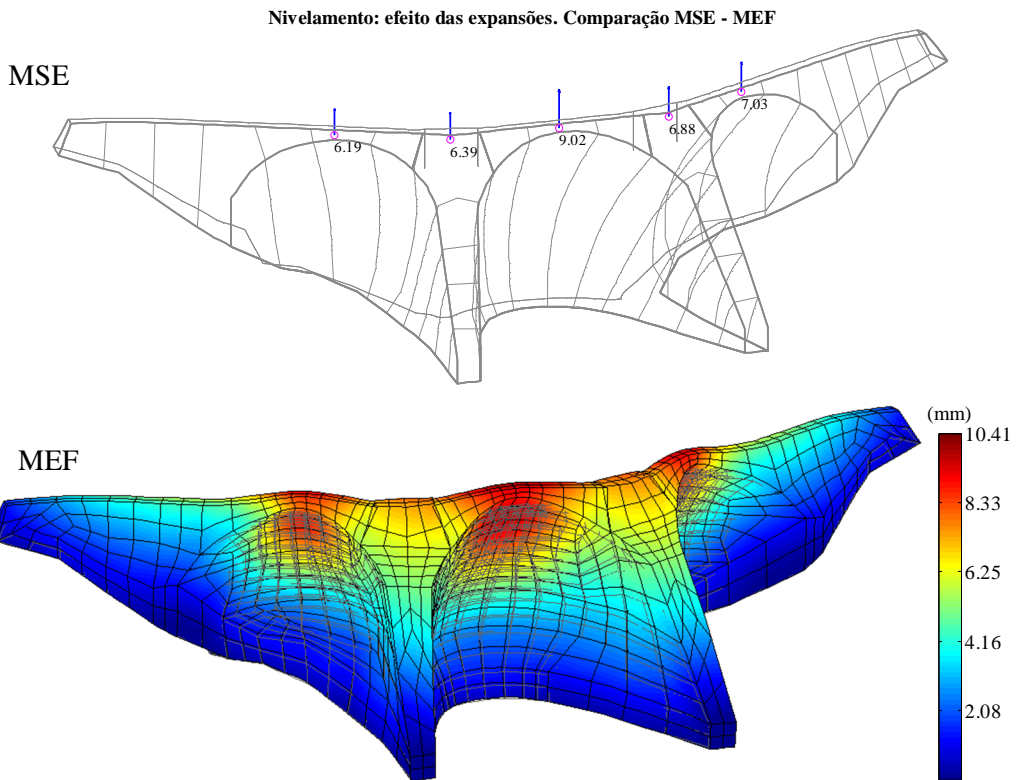


Figura 1.6 - Análise dos deslocamentos verticais no coroamento (nivelamento de precisão) com o programa **DamSafe3.0**. Comparação do efeito das expansões obtido com o MSE e calculado com o MEF.

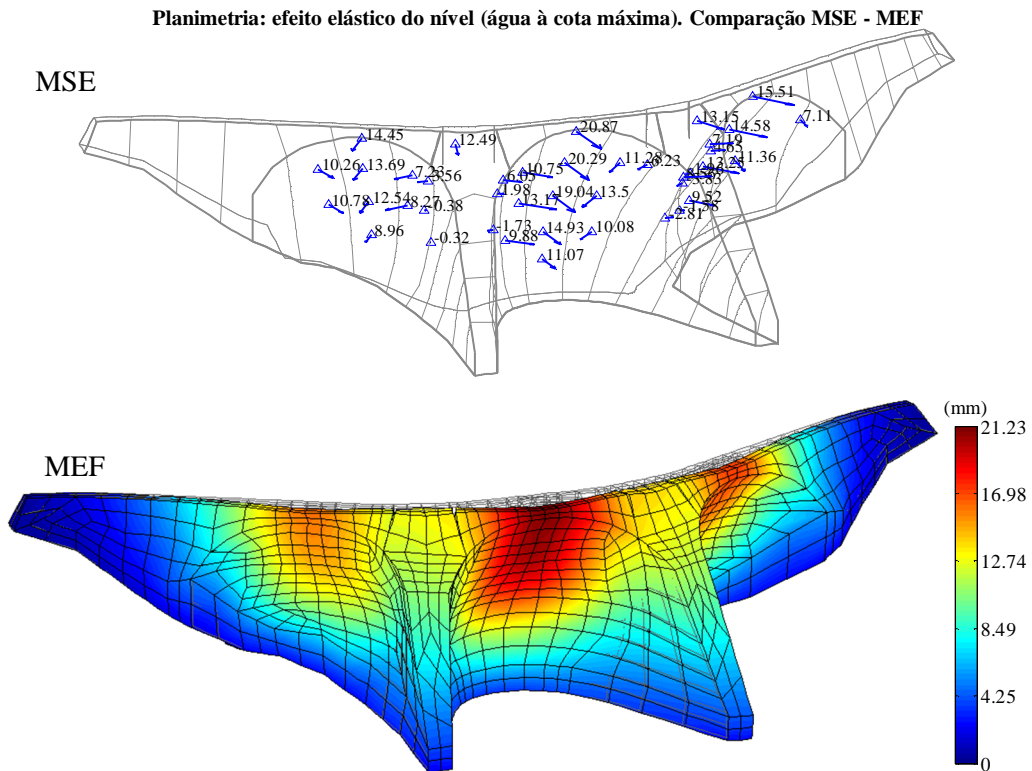


Figura 1.7 - Análise dos deslocamentos radiais medidos por geodesia com o programa **DamSafe3.0**. Comparação do efeito do nível obtido com o MSE e obtido com o MEF.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, onde se inclui a introdução e as conclusões. Em seguida será feito um breve resumo dos assuntos abordados em cada um dos capítulos.

Capítulo 2 - Modelos utilizados na análise do comportamento de barragens

No capítulo 2 são abordados e explicados os dois métodos utilizados neste trabalho para o estudo do comportamento da barragem da Aguieira. Primeiro falar-se-á sobre as barragens e a necessidade da sua monitorização e observação, devido aos problemas que possam existir e surgir ao longo da sua exploração. De seguida falar-se-á de um problema existente na barragem da Aguieira que são as expansões e a gravidade inerente a este tipo de fenómeno em estruturas de betão, mostrando-se resultados observados, pelos extensómetros corretores, das zonas onde existem expansões e também resultados observados nas bases de alongâmetro que mostram os deslocamentos que existem nas juntas. Por último são explicados os dois modelos utilizados para a análise da barragem da Aguieira, o modelo de elementos finitos e também como se podem gerar as malhas tridimensionais utilizadas nesse modelo e, o modelo de separação de efeitos e cada um dos efeitos presentes na barragem da Aguieira, como também a aplicação do método dos mínimos quadrados (MMQ).

Capítulo 3 - Análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira.

Resultados previstos através de modelos numéricos de elementos finitos

Neste capítulo faz-se uma apresentação das características gerais da obra em estudo (barragem da Aguieira), para uma melhor compreensão do seu comportamento aquando da análise dos resultados obtidos. Abordam-se alguns pontos como a sua localização ou a sua geometria, mas também e com especial atenção, as ações presentes na barragem, nomeadamente, a pressão hidrostática, as variações de temperatura e a ação expansiva e as características dos materiais, em particular as do betão utilizado na obra, devido à importância das curvas e coeficientes de fluência.

Com recurso à primeira componente do programa **DamSafe3.0**, elaborado no LNEC e desenvolvido em MATLAB, apresentam-se neste capítulo os resultados previstos através do modelo de elementos finitos. Serão estudados os resultados em relação a três ações e a uma combinação de ações, nomeadamente o peso próprio, a pressão hidrostática, as expansões e as três em simultâneo. Esses resultados são referentes ao campo de deslocamentos (horizontais e verticais), aos deslocamentos nos paramentos de montante e de jusante (horizontais, verticais e globais) e às tensões principais nos paramentos de montante e jusante.

Capítulo 4 - Utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos. Apresentação do programa DamSafe3.0, desenvolvido em MATLAB

Neste capítulo apresenta-se o programa **DamSafe3.0** referindo que é constituído por dois módulos: um módulo de elementos finitos (módulo MEF) e um módulo de separação de efeitos (módulo MSE). O programa **DamSafe3.0** desenvolvido no âmbito do presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa do comportamento de barragens de betão, recorrendo simultaneamente aos dois métodos já mencionados anteriormente, o método dos elementos finitos (MEF) e o método de separação de efeitos (MSE). Neste capítulo mostra-se a estrutura do programa **DamSafe3.0** e como o mesmo foi desenvolvido, desde os dados iniciais introduzidos e os ficheiros que lê, até aos gráficos de comparação dos dois métodos.

Capítulo 5 - Análise e interpretação do comportamento observado da barragem da Aguieira. Comparação de resultados de MEF e MSE

Neste capítulo mostram-se as potencialidades dos dois módulos MEF e MSE, implementados no programa **DamSafe3.0** no âmbito desta dissertação, para apoio à análise e interpretação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a processos expansivos, apresentando-se, como exemplo de aplicação, o caso da barragem da Aguieira.

O comportamento estrutural da barragem da Aguieira é estudado com base na análise das histórias de deslocamentos observados com fios de prumo e por métodos geodésicos, planimetria e nivelamento geométrico de precisão.

Capítulo 6 - Conclusões e perspetivas futuras

No sexto e último capítulo deste trabalho são apresentadas as conclusões tiradas no desenvolvimento e análise do estudo da barragem da Aguieira, bem como as principais contribuições desenvolvidas neste trabalho para possíveis desenvolvimentos futuros.

2

Modelos utilizados na análise do comportamento de barragens

2.1 Generalidades

A análise do comportamento estrutural de barragens é efetuada com base em resultados da observação, analisados através de modelos de separação de efeitos (MSE), e com base em resultados de modelos numéricos de elementos finitos (MEF). A utilização integrada de resultados de modelos de separação de efeitos e de modelos de elementos finitos permite efetuar estudos comparativos que são fundamentais para o controlo da segurança. Os modelos de elementos finitos (baseados nas equações fundamentais da mecânica estrutural: equação de Navier) e os modelos de separação de efeitos (onde através de histórias observadas ao longo do tempo é possível analisar grandezas e separar os efeitos sobre essas grandezas, provocados por ações existentes) são os dois tipos de modelos utilizados neste trabalho para o estudo da barragem da Aguieira, e que serão sumariamente apresentados neste segundo capítulo.

Para o controlo da segurança e da funcionalidade de uma barragem é necessário existir uma monitorização em permanência. Só assim é possível fazer-se de forma sistemática e periódica uma avaliação das condições em que se encontra a obra. É através dos registos dos dados que surgem da observação efetuada à obra que se consegue, pelo método de separação de efeitos, perceber o seu comportamento, comparando os resultados obtidos com os resultados previstos pelo método dos elementos finitos que foram previamente calibrados e ajustados.

Pretende-se assim, neste capítulo dois, mostrar a importância do controlo e observação nas obras, com especial atenção às barragens, dando exemplos de equipamentos utilizados e problemas que possam ocorrer.

Das possíveis patologias que podem surgir ao longo do tempo numa obra, as expansões no betão são cada vez mais relevantes e têm suscitado bastante interesse no estudo da sua evolução e consequente efeito nas obras. As expansões são uma reação que ocorre no betão e que leva a eventuais problemas nas obras como por exemplo o aparecimento de fendilhação. Neste capítulo será então abordado a existência de expansões no betão na barragem da Aguieira e serão mostrados resultados observados da evolução das expansões ao longo do tempo.

Assim, tal como foi dito, através dos dois métodos (MEF e MSE) que serão a seguir explicados, poder-se-á fazer a análise das patologias que das expansões e também outras ações poderão advir. Em relação ao método dos elementos finitos será explicada de forma sucinta como estes foram utilizados neste trabalho, desenvolvendo mais a parte relacionada com a elaboração de malhas tridimensionais. Para a separação de efeitos, em que o seu aperfeiçoamento é um dos focos principais deste trabalho, serão explicados de forma mais detalhada cada um dos efeitos, pois pretende-se adquirir um maior rigor nos mesmos, dando maior destaque aos efeitos do tempo, e assim, atingir-se um avanço aos modelos usualmente implementados, (Rocha, Serafim, & Silveira, 1958); (Willm & Beaujoint, 1967); (Gomes S. , 1981); (Castro, 1998) e (Mata, 2013), com a separação do efeito do tempo em diversas parcelas (Oliveira, 2000). Assim, serão consideradas um total de seis parcelas, no método de separação de efeitos, que são:

- Efeito da pressão hidrostática;
- Efeito da onda térmica anual;
- Efeito do tempo associado à fluência provocada pela pressão hidrostática (efeito viscoelástico, não patológico);
- Efeito do tempo associado à fluência do peso próprio (não patológico);
- Efeito do tempo associado aos movimentos de fundação;
- Efeito do tempo associado às expansões (patológico).

2.2 Controlo da segurança e observação de barragens

A monitorização de barragens é essencial para a segurança das mesmas e da envolvente, de modo a que se consiga prever o comportamento das barragens quando submetidas às ações a que estão sujeitas, mas também para os casos em que possam existir defeitos na conceção ou durante a exploração. A seguir são mencionadas algumas das causas mais frequentes para a ocorrência de problemas em barragens (ICOLD, 2017):

- Problemas de fundação (assentamentos e deslizamentos);
- Inadequadas conceções dos descarregadores;
- Bloqueio dos descarregadores por parte de detritos;
- Assentamentos globais;
- Falhas estruturais por defeito dos materiais;
- Ocorrência de fenómenos químicos (p. ex. expansões).

2.2.1 Observação das ações e da resposta

Por vezes, os problemas que surgem nas obras não são imediatamente detetáveis e podem escapar a uma inspeção visual. Com os registos dos aparelhos de observação instalados nas obras (Figura 2.1) é possível analisar o seu comportamento com base em medições efetuadas pontos chave, previamente escolhidos, e assim minimizar o risco de ocorrência de acidentes ou incidentes.

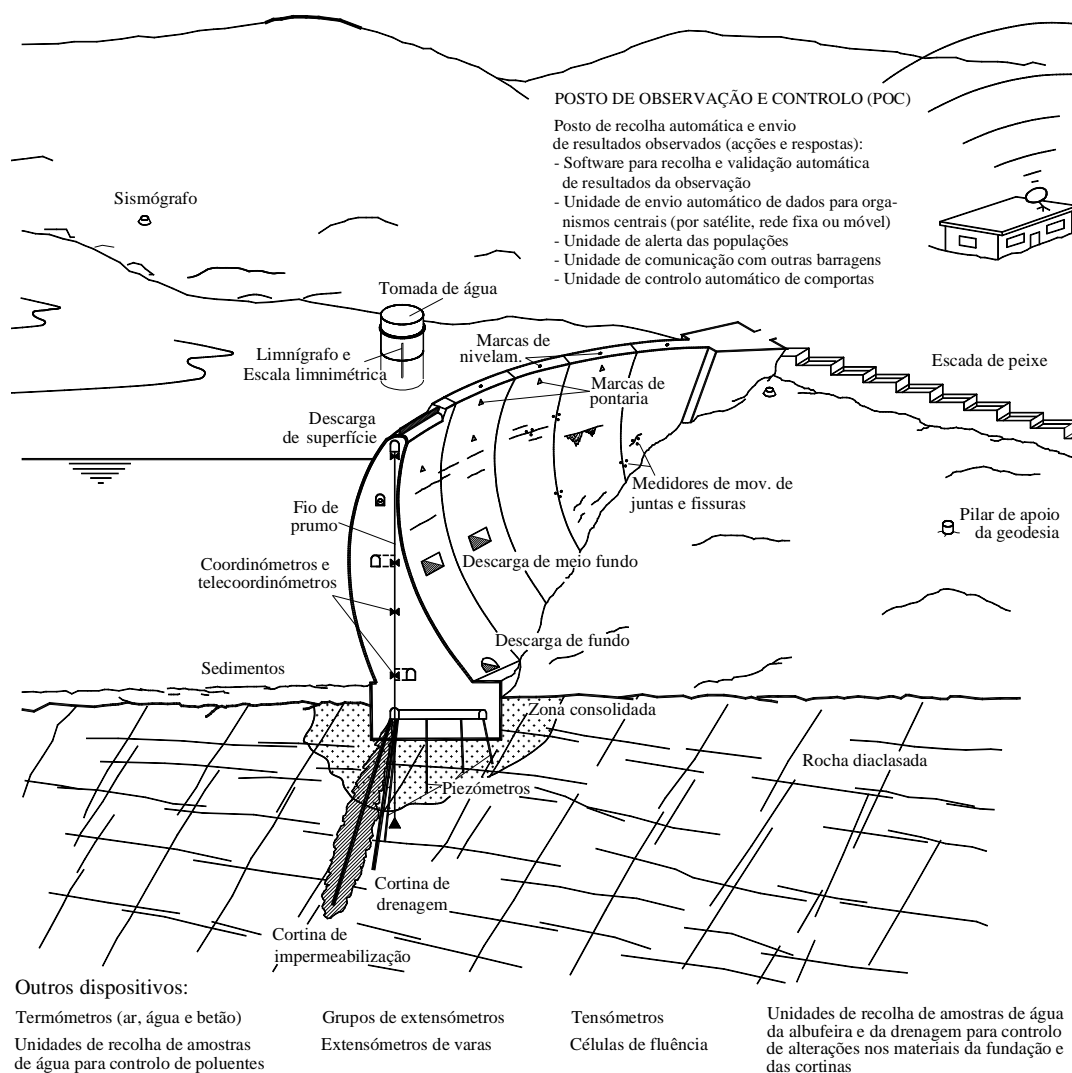


Figura 2.1 - Controlo da segurança de barragens de betão. Aparelhagem de observação (Oliveira, 2000).

Existem diversos tipos de aparelhos de observação, que registam os valores observados de várias grandezas ao longo do tempo, nomeadamente, grandezas que caracterizam a evolução ao longo do tempo das principais ações (p.ex. cota de água na albufeira e temperatura do ar), grandezas que caracterizam a resposta estrutural do corpo da obra e grandezas que caracterizam a resposta hidromecânica da fundação. Por exemplo, neste trabalho serão analisados os deslocamentos observados no corpo da barragem da Aguieira, medidos com fios de prumo e por métodos geodésicos. Porém existem muitas outras grandezas que são usualmente medidas, envolvendo outros tipos de aparelhos de medição para além dos já mencionados como, por exemplo, extensómetros Carlson, termómetros, extensómetros de varas, medidores de junta, bases de alongâmetro, piezómetros, medidores de caudal, clinómetros, sismógrafos, entre muitos outros (Torres, 2010).

Neste trabalho apresentam-se resultados referentes à análise de histórias observadas referentes a deslocamentos medidos pelo método dos fios de prumo (deslocamentos horizontais) e por métodos geodésicos, ou seja, planimetria (deslocamentos horizontais) e nivelamento (deslocamentos verticais).

Na Figura 2.2 encontram-se exemplos dos aparelhos utilizados na medição de deslocamentos, onde se pode ver, por exemplo, o flutuador de um fio de prumo invertido, a respetiva caixa onde se encontra o fio de prumo e a base de coordenómetro, outro fio de prumo mas agora numa cota inferior à cota onde se encontra o flutuador (Brum, 2015), um taqueómetro (Jensens, 2017) e um pilar geodésico (Brum, 2015).

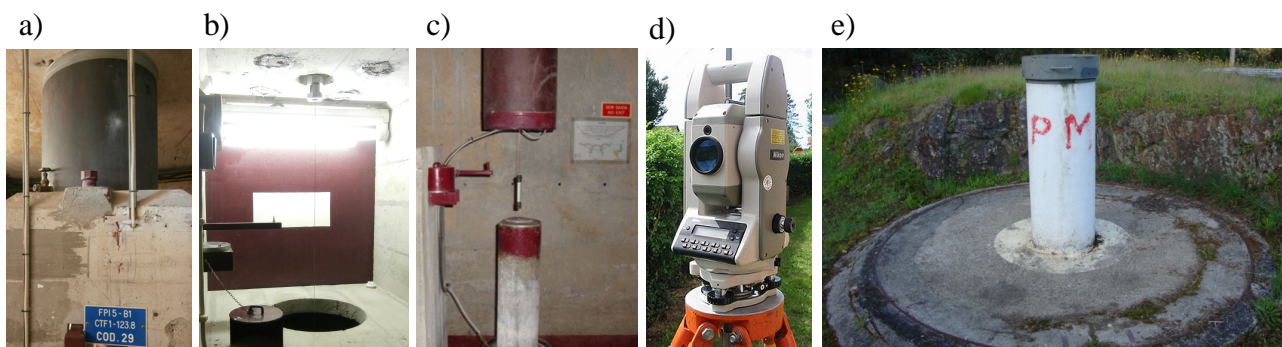


Figura 2.2 - Exemplos de aparelhos de observação. a) Flutuador do fio de prumo; b) Fio de prumo e respetiva base de coordenómetro junto ao flutuador; c) Fio de prumo e respetiva base de coordenómetro a cota diferente da localização do flutuador (Brum, 2015); d) Taqueómetro (Jensens, 2017); e) Pilar geodésico (Brum, 2015).

Como se pode ver na Figura 2.4, a evolução das expansões é caracterizada, numa fase inicial, por uma taxa de crescimento quase nula (o gel desenvolve-se e vai ocupando os microporos ainda vazios, e não existe, portanto, aumento de volume). Na fase seguinte é possível ver-se a subida gradual da curva, com um ponto de inflexão sensivelmente a meio, até que, numa fase final, a taxa de crescimento das expansões tende a anular-se, devido ao esgotamento dos componentes reativos.

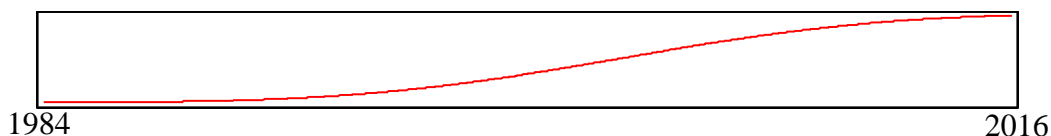


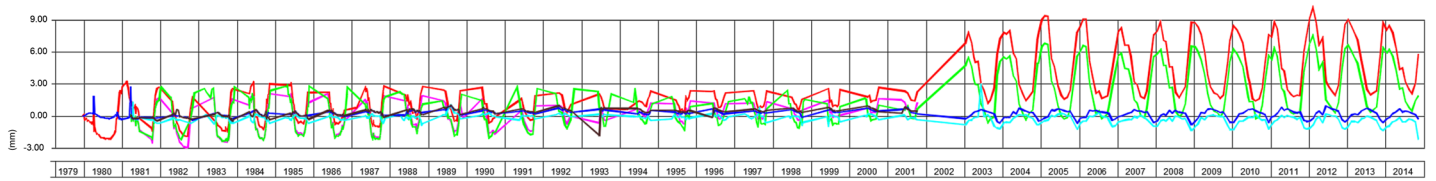
Figura 2.4 - Curva típica representativa da evolução de extensões devida a reações expansivas.

2.2.3 Observação de movimentos de junta

Na análise do comportamento de barragens abóbada é essencial a observação dos movimentos de junta: abertura/fecho e deslizamento na direção vertical e na direção horizontal. Para tal podem utilizar-se bases de alongâmetro e medidores de junta eléctricos. Na Figura 2.5 a) mostra-se, para o caso da barragem da Aguieira, a evolução dos movimentos da junta entre a abóbada central e o contraforte esquerdo medidos com três bases de alongâmetro colocadas na galeria do coroamento: duas bases no piso e uma no hasteal. Até 2003 existem falhas de leitura devido aos valores estarem fora do campo de medida do alongâmetro utilizado. Após a substituição do alongâmetro, em 2003, passou a ser possível registar os valores de abertura/fecho com amplitude de cerca de 10 mm.

Na Figura 2.5 b) apresentam-se os valores do aumento da abertura média (mm) entre 1980 e 2016 registados nas principais bases de alongâmetro instaladas na barragem da Aguieira. É de esperar que quando existem expansões, estas sejam mais expressivas a meia espessura sendo de esperar que as bases de alongâmetro a meia espessura registem uma tendência evolutiva de fecho. Contudo, no caso das bases de alongâmetro que estão localizadas nas zonas mais perto dos paramentos o comportamento devido às expansões pode indicar tendência de abertura. Contudo, deve-se ter em atenção que consoante a posição em espessura nem sempre será fácil correlacionar o movimento das juntas ao longo do tempo com a evolução de eventuais processos expansivos. É possível haver aberturas de junta ao longo do tempo que não tenham a ver diretamente com as expansões podendo ser devidas, por exemplo, ao efeito elástico e viscoelástico do nível de água como poderá ser o caso das aberturas das juntas da barragem da Aguieira entre as abóbadas e os contrafortes, ao nível do coroamento. Teoricamente, em barragem do tipo abóbada simples, é essencial que quando sujeitas à pressão hidrostática a resposta ocorra com as juntas fechadas.

a) Evolução da abertura de junta medida nas bases de alongômetro



CÓDIGO	IDENT.	JUNTA	COTA (m)	(Abt)	(Dlz)
130	154	4	123.9	(Abt)	(Dlz)
154	189	4	123.6	(Abt)	(Dlz)
155	190	4	124.5	(Abt)	(Dlz)

b) Progressão ao longo do tempo da abertura de juntas.
Aumento da abertura média entre 1980 e 2016 em (mm)

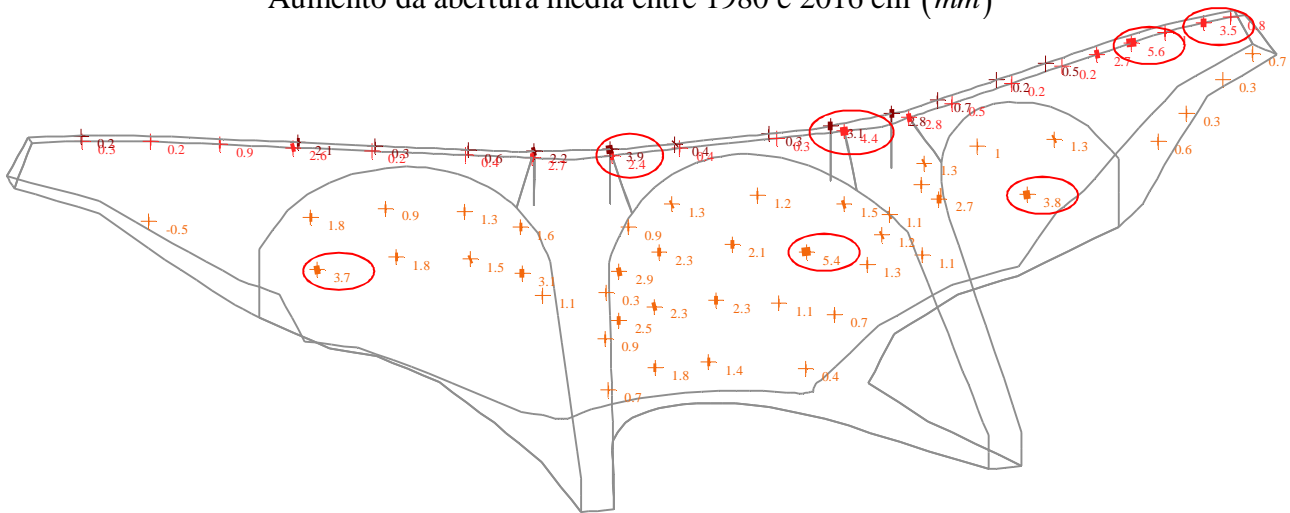


Figura 2.5 - Juntas com abertura progressiva. a) Evolução da abertura de junta medida na base de alongômetro 154. Base situada na junta entre o contraforte direito e a abóbada central ao nível da galeria do coroamento; b) Valores do aumento da abertura média (em mm) registados em bases de alongômetro entre 1980 e 2016.

2.3 Modelos Numéricos de elementos finitos

A modelação do comportamento estrutural de barragens sob a ação das diversas solicitações a que estão sujeitas é efetuada com base nas equações que se apresentam na Figura 2.7 a) e que conduzem à formulação de um problema de valores de fronteira envolvendo a equação de Navier (Figura 2.7 b)). A solução numérica deste problema é usualmente obtida com base no método dos elementos finitos (Zienkiewicz, 1967), o que conduz à obtenção de uma equação global de equilíbrio que, para o caso estático, envolve a matriz rigidez global \underline{k} cuja dimensão depende da discretização adotada, como se ilustra esquematicamente na Figura 2.7 b).

Neste trabalho foi adotada uma formulação de elementos finitos tridimensionais cúbicos de 20 pontos nodais, implementada no programa **DamSafe3.0**, o qual apresenta no capítulo 4.

Na análise de estruturas pelo método dos elementos finitos é fundamental dispor de *software* adequado para a geração de malhas, nomeadamente para o caso de estruturas maciças tridimensionais como é o caso das barragens. Na análise de estruturas maciças tridimensionais é usual adotar elementos finitos tetraédricos, hexaédricos de oito pontos nodais ou de 20 pontos nodais (Figura 2.6).

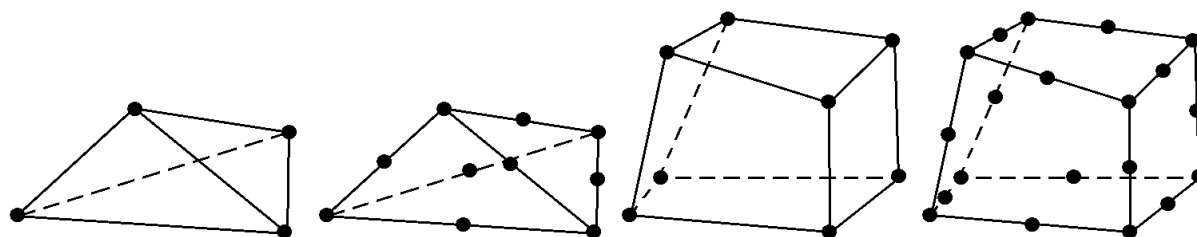
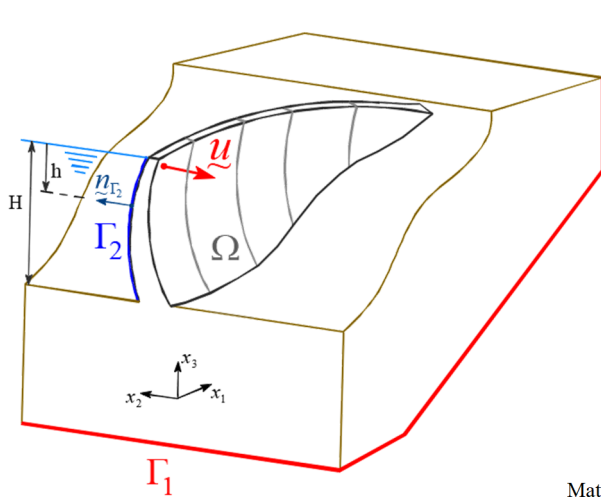


Figura 2.6 - Elementos finitos tetraédricos e hexaédricos.

Existem diversas formas de se gerarem malhas de elementos finitos. Quando são malhas regulares, com um número de pontos nodais e de elementos finitos reduzido, é possível gerar as malhas manualmente ou recorrendo a pequenos programas elaborados pelos próprios utilizadores. No caso de malhas mais complexas, estas devem ser geradas com base em programas de geração automática de malhas.

a) Equações fundamentais da mecânica dos sólidos



$$\underline{\underline{u}} = \begin{bmatrix} u_1(x_1, x_2, x_3, t) \\ u_2(x_1, x_2, x_3, t) \\ u_3(x_1, x_2, x_3, t) \end{bmatrix} \quad (3 \times 1)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (6 \times 1)$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (6 \times 1)$$

Relação deformações-deslocamentos

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{L}} \underline{\underline{u}} \quad (\text{pequenas deformações})$$

Equação constitutiva

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}_0)$$

Equação de equilíbrio (ações estáticas e dinâmicas)

$$\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{f}} = \underline{\underline{Q}}, \quad \underline{\underline{f}} = m \underline{\underline{g}}$$

Matriz de elasticidade (material isotrópico)

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} K_v \frac{4}{3} G & K_v \frac{2}{3} G & K_v \frac{2}{3} G & & & \\ & K_v \frac{4}{3} G & K_v \frac{2}{3} G & & & \\ \text{sim.} & & K_v \frac{4}{3} G & & & \\ & & & G & & \\ & & & & G & \\ & & & & & G \end{bmatrix} \quad (6 \times 6)$$

$$K_v = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Operador diferencial

$$\underline{\underline{L}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (6 \times 3)$$

b) Resolução numérica da equação de Navier pelo método dos elementos finitos



$$\text{MEF} \rightarrow \underline{\underline{k}} \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{f}}(t)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{\underline{L}}^T (\underline{\underline{D}} \underline{\underline{L}} \underline{\underline{u}}) + \underline{\underline{f}} = \underline{\underline{Q}}, \text{ a verificar em toda a estrutura} \\ \text{Condições de fronteira} \end{array} \right.$$

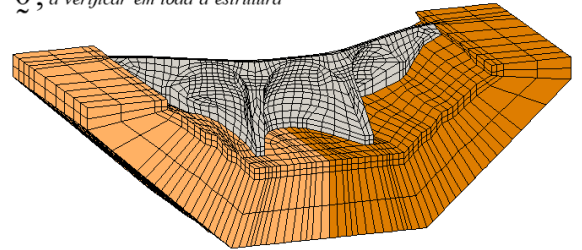


Figura 2.7 - Modelação do comportamento de barragens sob ações estáticas: equações fundamentais. a) Representação esquemática de uma barragem (Ω) com indicação das fronteiras Γ_1 (em que se impõem deslocamentos nulos) e Γ_2 (em que se aplicam tensões normais correspondentes à pressão hidrostática); b) A resolução numérica pelo MEF da equação de Navier conduz à equação de equilíbrio na forma discreta: $\underline{\underline{k}} \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{f}}(t)$.

Atualmente existem vários programas comerciais para geração automática de malhas de EF3D, com os quais é possível gerar facilmente, com base em gráficos interativos diferentes tipos de malhas de elementos finitos tridimensionais. Na Figura 2.8 mostram-se exemplos de malhas geradas com os referidos programas comerciais.

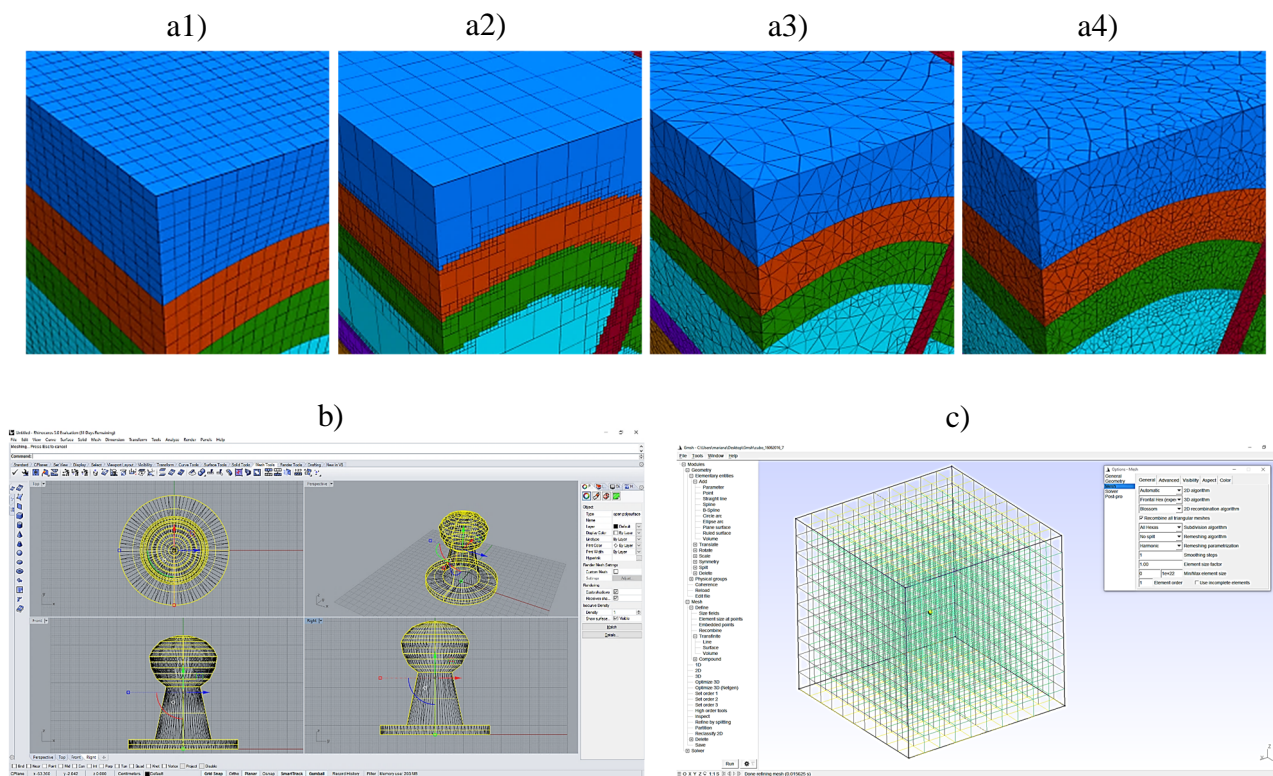
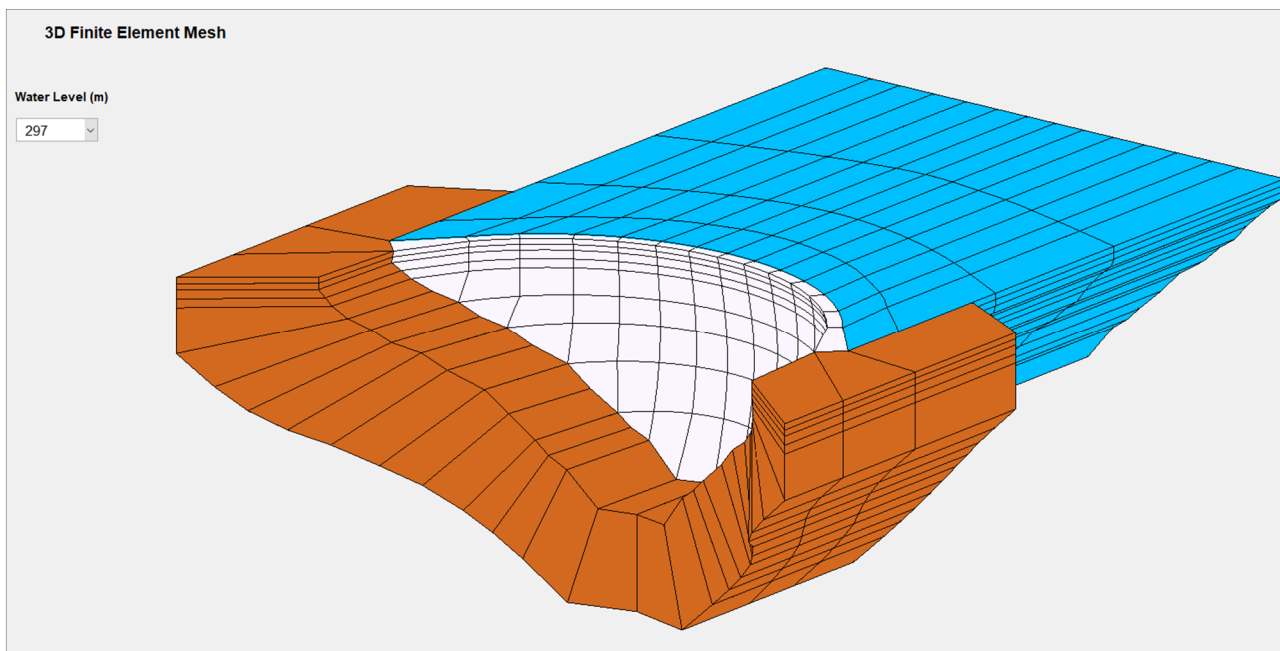


Figura 2.8 - Exemplos de malhas geradas com programas comerciais. a1) Malha hexaédrica regular; a2) Malha hexaédrica irregular; a3) Malha tetraédrica; a4) Malha tetraédrica para hexaédrica (Itasca, 2016); b) Interface e exemplo de uma malha de um cabeço de amarração de um navio desenvolvida no programa Rhinoceros; c) Interface e exemplo de malha 3D regular gerada com o programa Gmsh (acesso livre).

Quanto à elaboração de malhas de elementos finitos 3D para barragens abóbada é conveniente utilizar programas desenvolvidos especialmente para o efeito como é o caso do programa **Dam3DMesh1.0** desenvolvido no LNEC-DBB que, para o caso de abóbadas simples, permite gerar malhas tridimensionais de sistemas barragem-fundação-albufera por extrusão de malhas planas do alçado da barragem (malhas em projeção no plano x-z, elaboradas em ACAD). A extrusão é efetuada tendo em conta as equações de forma da barragem e o número de elementos em espessura pretendidos. A albufera é gerada por extrusão da malha no paramento de montante e a fundação é gerada por extrusão da malha na superfície de inserção: extrusão para baixo e depois para montante e para jusante (Figura 2.9).

Barragem do Cabril - H = 132 m



Barragem de Baihetan (China) - H = 289 m

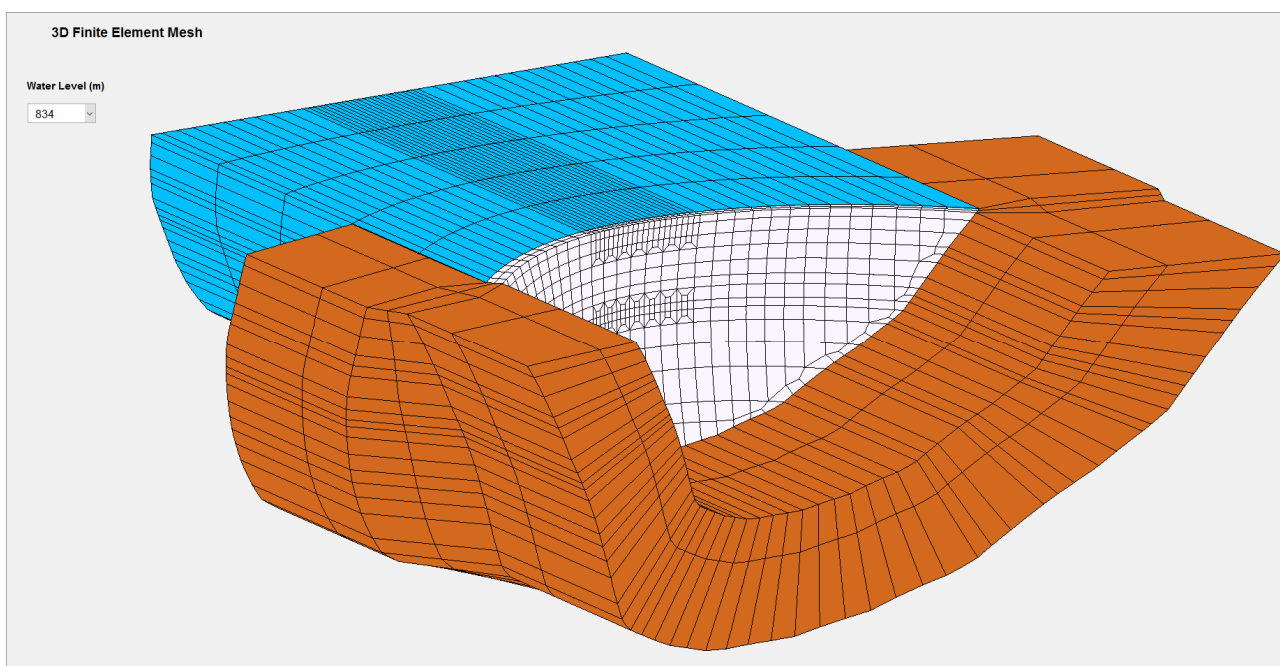
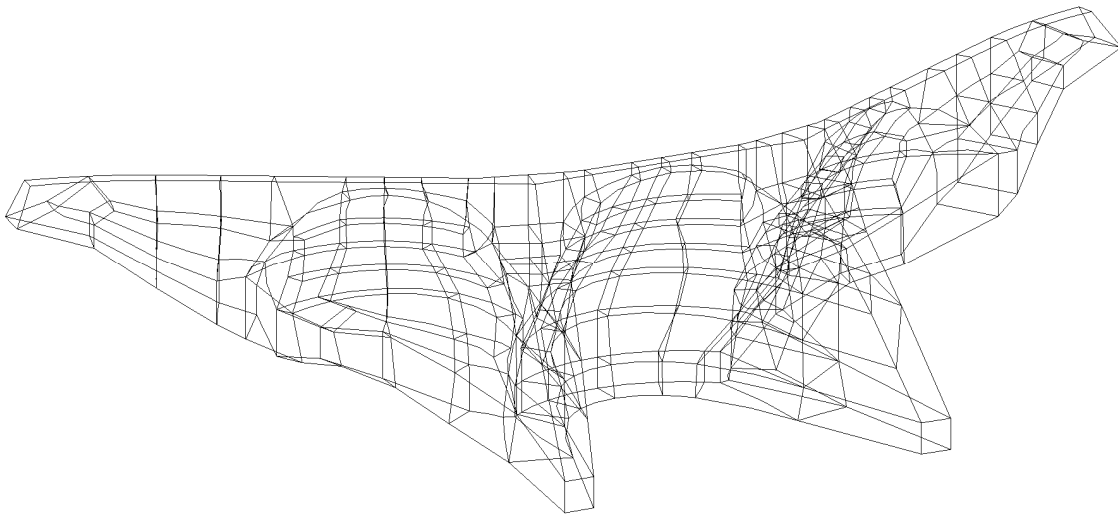


Figura 2.9 - Malhas de elementos finitos 3D de barragens abóbada. Geradas automaticamente com o programa **DamMesh3D1.0** (desenvolvido em MATLAB). As malhas 3D são geradas a partir de malhas planas (em alçado) e das equações de forma das barragens fornecidas pelos projetistas.

Para geração de malhas de barragens com geometrias mais complexas como é o caso da barragem da Aguieira, com três abóbadas apoiadas em dois contrafortes centrais a estratégia passa por desenvolver manualmente malhas largas de elementos finitos do 2º grau tipo cubo com 20 pontos nodais (hexaedros) e, a partir dessas malhas largas, gerar malhas refinadas recorrendo ao programa **Mesh3DRefin1.0** desenvolvido no âmbito desta dissertação (Figura 2.10) com o qual o refinamento é efetuado recorrendo a interpolações do 2º grau o que é fundamental no refinamento das zonas curvas (abóbadas).

a) Malha larga de EF3D, tipo cubo do 2º grau (hexaedros)



b) Malha refinada obtida automaticamente a partir da anterior com interpolações do 2º grau

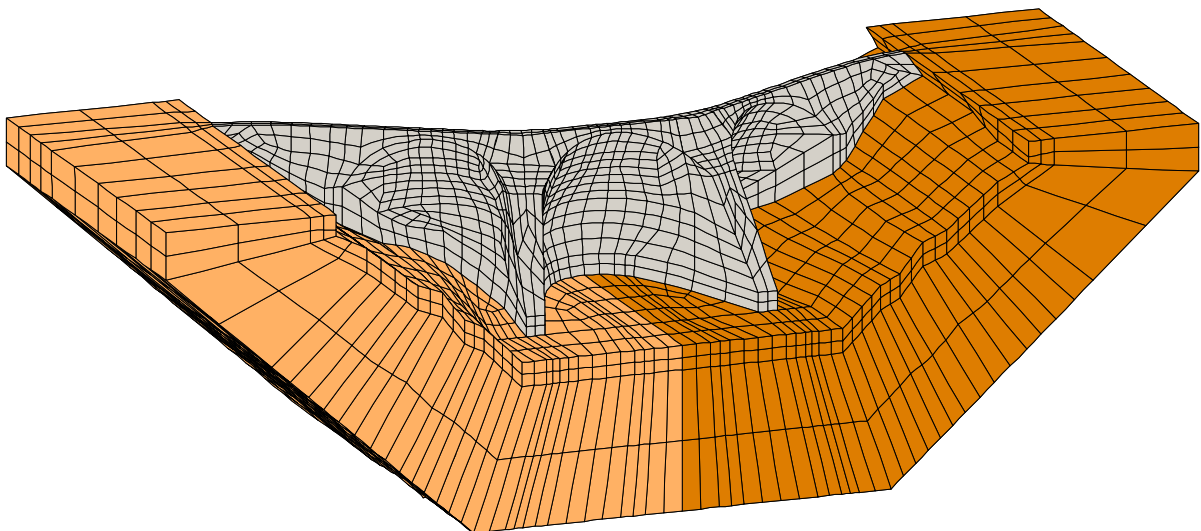


Figura 2.10 - Utilização do programa **Mesh3DRefin1.0** desenvolvido no âmbito desta dissertação para refinamento de malhas de EF3D tipo cubo de 20 pontos nodais (hexaedros). a) Malha larga; b) Malha refinada.

2.4 Modelos de separação de efeitos (MSE)

Em barragens os modelos de separação de efeitos são muito utilizados para analisar separadamente os efeitos provocados pelas várias ações que atuam sobre as obras (Rocha, Serafim, & Silveira, 1958). Na observação de barragens admite-se que, conhecendo a evolução de cada uma das principais ações ao longo do tempo, é possível analisar as histórias ao longo do tempo referentes a cada uma das grandezas observadas (por exemplo história do deslocamento radial num determinado ponto) separando os efeitos associados às diversas ações.

Com os MSE um dos grandes objetivos é separar efeitos patológicos que ocorram ao longo do tempo, dos efeitos do tempo normais, como é o caso, por exemplo, da fluência associada à pressão hidrostática ou ao peso próprio. Para conseguir este objetivo é conveniente utilizar modelos de separação de efeitos que permitam distinguir os efeitos viscoelásticos (fluência associada à PH e fluência associada ao PP) de outros efeitos do tempo, como, por exemplo, o efeito das expansões.

Seguidamente apresentam-se os fundamentos dos MSE, referindo o tipo de funções que podem ser adotadas para simular cada efeito e como se pode usar o método dos mínimos quadrados (MMQ) para obter a pretendida separação de efeitos, ou seja, para obter os parâmetros das referidas funções por forma a que a soma dessas funções permita obter uma função global, correspondente à sobreposição de todos os efeitos, que se ajuste da melhor forma aos valores observados.

2.4.1 Fundamentos dos MSE

Para se conseguir separar efeitos é fundamental conhecer como variam as principais ações ao longo do tempo, nomeadamente, a cota de água e a temperatura do ar.

Devido à variação do nível de água na albufeira ocorrem, correspondentemente, variações dos deslocamentos de forma instantânea (resposta elástica da obra) e variações diferidas (resposta viscoelástica ou de fluência).

Para se obterem bons resultados em termos de separação de efeitos é conveniente ter observações em quantidade, obtidas com base em medições de qualidade e bem distribuídas ao longo do tempo por forma a ter valores observados em todas as épocas do ano e para valores das cotas de água bem representativos de todos os patamares de enchimento. Só desta forma é possível obter bons resultados com os modelos de separação de efeitos.

Quando não existem dados da observação suficientes para caracterizar bem a resposta da obra associada a uma dada solicitação é possível utilizar modelos de separação de efeitos alternativos que incorporem informação suplementar, nomeadamente resultante de modelos numéricos de elementos finitos. Por exemplo a resposta elástica associada à pressão hidrostática para várias cotas de água, pode ser obtida com base em modelos de elementos finitos devidamente calibrados. Da mesma forma,

também a resposta de fluência associada ao peso próprio pode ser estimada com base na resposta elástica calculada pelo MEF para a ação do peso próprio e com base num prévio conhecimento dos parâmetros de fluência (nota: a resposta elástica para a ação do peso próprio não pode ser observada após a obra estar construída, porque, ao contrário das outras ações, o peso próprio vai-se instalando progressivamente durante a construção).

Com este tipo de informações e com recurso ao método dos mínimos quadrados (MMQ) pode-se conseguir obter uma curva ajustada às observações efetuadas.

2.4.1.1 Utilização do MMQ na resolução do problema da separação de efeitos

Nos modelos de separação de efeitos admite-se, geralmente, que os valores observados de uma dada grandeza (p.ex. deslocamento radial num ponto) dependem dos valores das principais ações ou, mais explicitamente, dependem da altura de água (h), da temperatura do ar (T_{ar}) e do tempo decorrido desde o final da construção (t). Então, há que definir o modelo de separação de efeitos que se pretende utilizar devendo, para tal, ser escolhido um dado conjunto de funções matemáticas (dependentes das variáveis h , T_{ar} e t) adequadas para simular os diferentes efeitos. A escolha destas funções deve ter por base algum conhecimento físico sobre a resposta da obra às diferentes ações, como se discute na seguinte secção 2.4.2. A combinação linear destas funções corresponde à sobreposição dos vários efeitos e, por isso, admite-se que corresponde a uma função, de vários termos, que é representativa da resposta observada total podendo-se ter, por exemplo

$$u_{obs(N)} = \underbrace{a(e^{h/20} - 1)}_{\text{Efeito do nível}} + \underbrace{bT_{ar}}_{\text{Efeito da temperatura}} + \underbrace{ct + dt^2}_{\text{Efeito do tempo}} + \underbrace{k}_{\substack{\downarrow \\ \text{Termo independente}}} \quad (2.1)$$

Onde o primeiro termo $a(e^{h/20} - 1)$ é relativo ao efeito elástico do nível, o segundo termo bT_{ar} representa o efeito elástico da temperatura, os termos $ct + dt^2$ representam os efeitos do tempo e o último termo k corresponde ao denominado termo independente.

Neste modelo de separação de efeitos há um total de cinco parâmetros a determinar: a , b , c , d , k . Então, tendo N épocas de observação pode ser estabelecido um sistema de N equações com cinco incógnitas, correspondentes aos cinco parâmetros a determinar:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{obs(1)} = a \left(e^{h_1/20} - 1 \right) + b T_{ar_1} + c t_1 + d t_1^2 + k \\ \mathbf{u}_{obs(2)} = a \left(e^{h_2/20} - 1 \right) + b T_{ar_2} + c t_2 + d t_2^2 + k \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{obs(N)} = a \left(e^{h_N/20} - 1 \right) + b T_{ar_N} + c t_N + d t_N^2 + k \end{cases} \quad (2.2)$$

Em geral, existirão muito mais equações do que incógnitas pelo que o sistema terá que ser resolvido pelo MMQ. Na forma matricial o sistema anterior fica:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{obs(1)} \\ \mathbf{u}_{obs(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{obs(N)} \end{bmatrix}}_{\substack{\mathbf{b} \\ N \times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left(e^{h_1/20} - 1 \right) & T_{ar_1} & t_1 & t_1^2 & 1 \\ \left(e^{h_2/20} - 1 \right) & T_{ar_2} & t_2 & t_2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(e^{h_N/20} - 1 \right) & T_{ar_N} & t_N & t_N^2 & 1 \end{bmatrix}}_{\substack{\mathbf{A} \\ N \times 5}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ k \end{bmatrix}}_{\substack{\mathbf{x} \\ 5 \times 1}} \quad (2.3)$$

ou

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2.4)$$

O passo seguinte, correspondente à aplicação do MMQ, consiste em multiplicar ambos os membros por \mathbf{A}^T ficando então a matriz quadrada $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ o que permite determinar o vetor \mathbf{x} dos parâmetros que se pretendem calcular

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{x} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2.6)$$

Obtém-se assim a solução do sistema $\mathbf{x} = [a \ b \ c \ d \ k]$, pelo método dos mínimos quadrados.

Após o cálculo destes parâmetros correspondentes às funções representativas dos vários efeitos é possível desenhar a curva ajustada aos valores observados, como se ilustra na Figura 2.11.

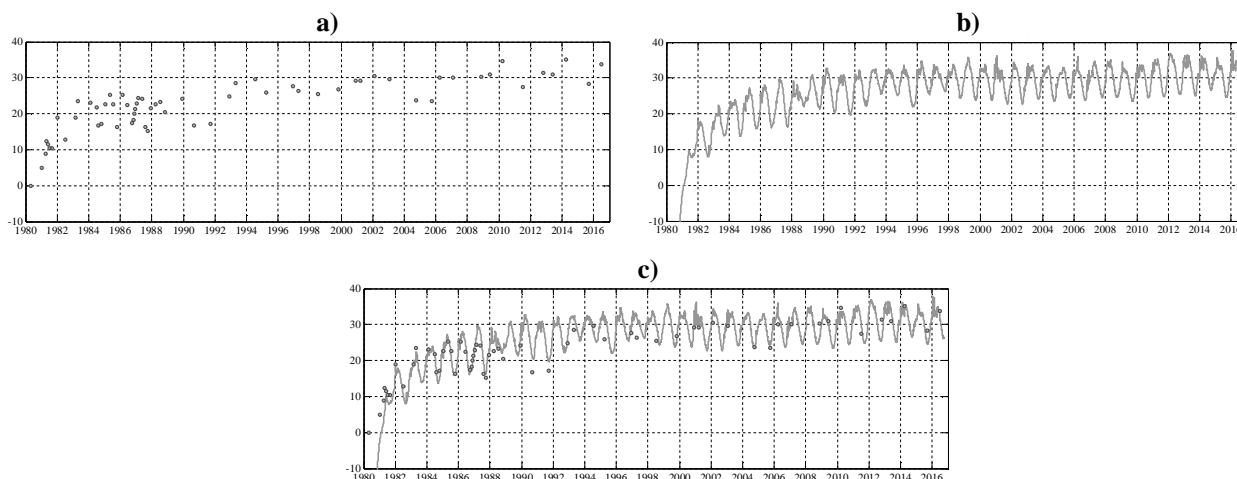


Figura 2.11 - Análise dos deslocamentos radiais observados longo o tempo num dado ponto de uma barragem. a) Deslocamentos observados; b) Deslocamentos obtidos pelo MSE com ajuste pelo MMQ; c) Sobreposição dos deslocamentos observados com os ajustados pelo MMQ.

2.4.1.2 Fixação de um parâmetro no método dos mínimos quadrados

Foi mencionado anteriormente que no caso de não existirem dados suficientes para se ajustar corretamente o efeito elástico do nível, é possível simular o comportamento da barragem para várias cotas de água, recorrendo ao MEF. Essa simulação pode ser feita uma vez que existe bastante confiança nos cálculos efetuados pelo MEF.

Em termos de cálculo, a fixação do parâmetro a por forma a que este esteja de acordo com os resultados dos modelos dos elementos finitos, pode ser efetuada introduzindo uma restrição no sistema $\underline{A} \underline{x} = \underline{b}$ recorrendo ao método da penalidade.

2.4.2 Análise dos efeitos associados às principais ações em barragens

Nesta secção analisam-se de forma mais detalhada os efeitos associados às principais ações em barragens referindo as funções matemáticas mais adequadas para representar cada um desses efeitos. Assim, na análise por separação de efeitos de uma determinada grandeza observada há que ter em conta as histórias observadas da altura de água e da temperatura do ar, que, como referido, correspondem às principais ações observadas. Os valores registados referentes à grandeza a observar correspondem à resposta observada ou à história da resposta observada (ver Figura 2.12).

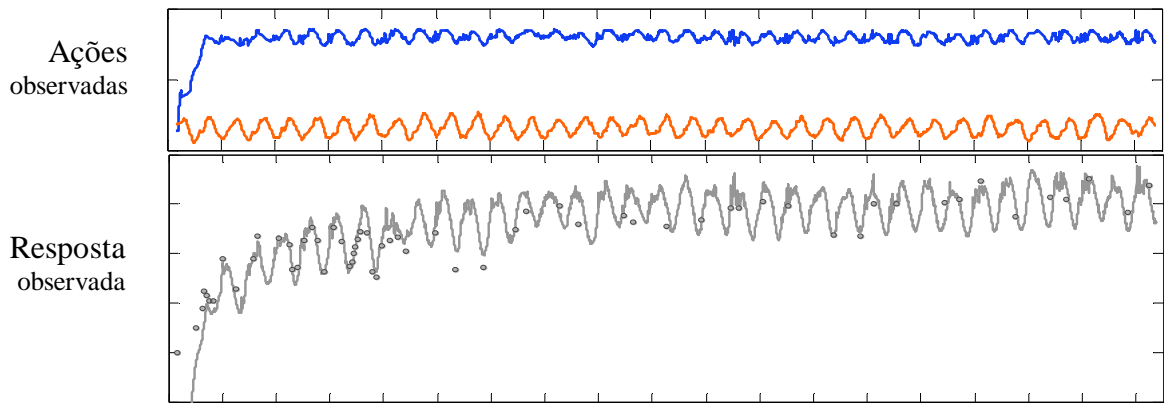


Figura 2.12 - Gráficos das ações e da resposta observada do deslocamento radial num ponto: valores observados e curva do MSE.

No caso da grandeza observada corresponder a um deslocamento sabe-se, como referido, que este depende essencialmente da altura de água na albufeira (h), da temperatura do ar (T_{ar}) e do tempo decorrido desde o final da construção (t).

Os modelos de separação de efeitos baseiam-se no princípio de que o deslocamento u num ponto da barragem pode ser expresso como uma combinação de funções representativas de cada efeito, sendo funções que dependem das anteriormente referidas variáveis h , T_{ar} e t .

Um modelo de separação de efeitos mais geral do que o referido atrás para ilustrar a aplicação do MMQ deverá incluir as seguintes parcelas correspondentes a efeitos normais, elásticos e viscoelásticos, e efeitos patológicos (ver representação gráfica na Figura 2.13)

$$u(h, T_{ar}, t) = \underbrace{u_e^{PH}(h)}_{\text{Efeito elástico do nível}} + \underbrace{u_e^{VT}(T_{ar})}_{\text{Efeito da temperatura}} + \underbrace{u_F^{PH}(h, t)}_{\text{Efeito de fluência do nível}} + \underbrace{u_F^{PP}(t)}_{\text{Efeito de fluência do peso próprio}} + \underbrace{u_{exp}(t)}_{\text{Efeito do tempo, expansões}} + \underbrace{u_{fund}(t)}_{\text{Efeito dos movimentos da fundação}} + \underbrace{k}_{\text{Termo independente}} \quad (2.7)$$

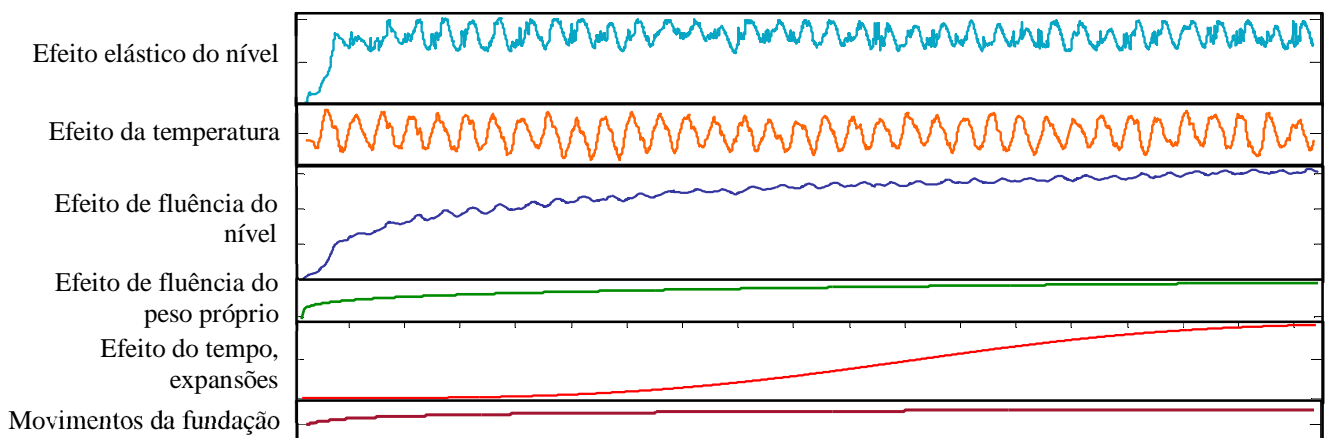


Figura 2.13 - Representação gráfica da evolução ao longo do tempo dos diferentes efeitos a considerar num modelo de separação de efeitos geral.

Para cada um dos efeitos mostra-se uma função matemática que se considera adequada para a respetiva simulação:

$$\text{Efeito elástico do nível} \quad u_e^{PH}(h) = a \left(e^{h/c_f} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$\text{Efeito da temperatura} \quad u_e^{VT}(\bar{t}) = b T_{ar} \quad (2.9)$$

$$\text{Efeito de fluência do nível} \quad u_F^{PH}(h, t) = a \sum \phi(t, t_0) \Delta u_e^{PH} \quad (2.10)$$

$$\text{Efeito de fluência do peso próprio} \quad u_F^{PP}(t) = \phi(t, t_0) u_e^{PP} \quad (2.11)$$

$$\text{Efeito do tempo, expansões} \quad u_{exp}(t) = c t \quad (2.12)$$

$$\text{Movimentos da fundação} \quad u_{fund}(t) = d \log \left(1 + \frac{t}{1000} \right) \quad (2.13)$$

Substituindo cada uma das funções anteriores na eq. (2.7) obtém-se a seguinte função que corresponde a um modelo de separação de efeitos, relativamente geral. Nessa função pretende-se obter cada um dos parâmetros a , b , c e d para que seja feito o melhor ajuste possível pelo (MMQ).

$$u(h, T_{ar}, t) = a \left(e^{h/20} - 1 \right) + b T_{ar} + a \sum \phi \Delta u_e^{PH} + \phi(t) u_e^{PP} + c t + d \log \left(1 + \frac{t}{1000} \right) + k \quad (2.14)$$

Parâmetros a identificar pelo MMQ

- a** - Efeito elástico do nível e efeito viscoelástico
- b** - Efeito da temperatura
- c** - Efeito do tempo (expansões)
- d** - Movimentos da fundação
- k** - Termo independente

A representação gráfica da anterior função, após ajuste pelo MMQ a um dado conjunto de observações, apresenta-se na Figura 2.14, onde, para além do referido ajuste aos valores observados, se mostra cada uma das parcelas calculadas pelo modelo de separação de efeitos.

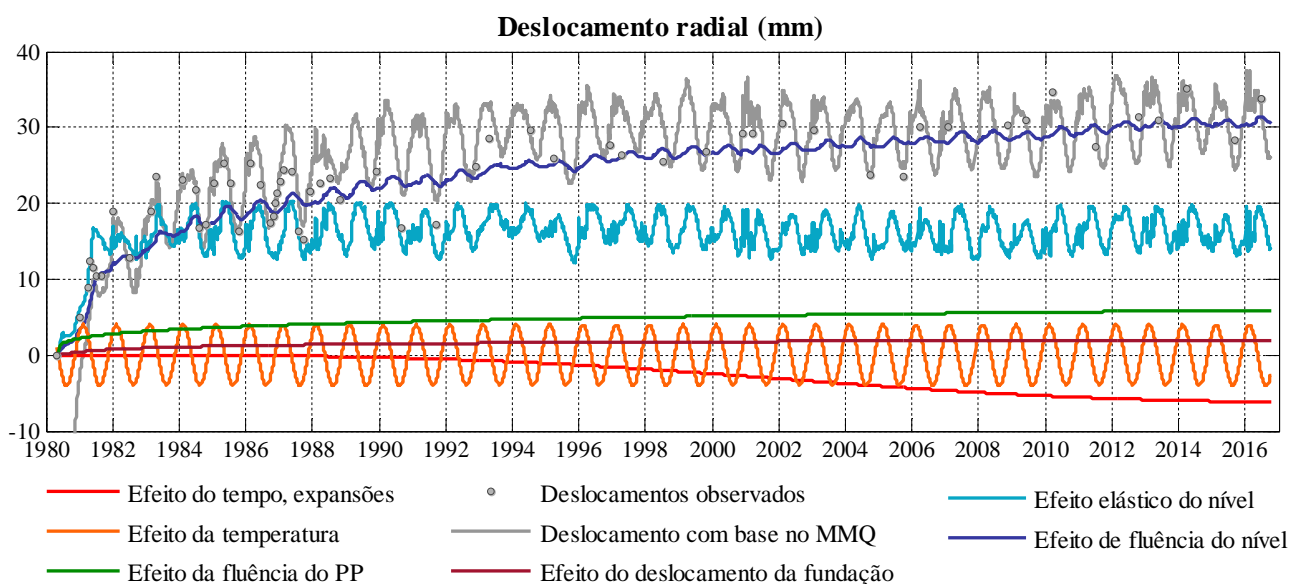


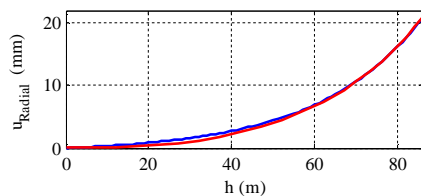
Figura 2.14 - Exemplo de gráfico de separação de efeitos de um aparelho de observação.

Nos pontos seguintes analisam-se com maior detalhe as funções utilizadas para simular cada um dos diferentes efeitos atrás introduzidos.

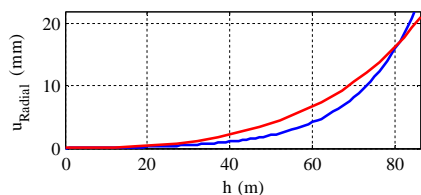
2.4.2.1 Efeito elástico do nível $u_e^{PH}(h)$

O efeito elástico do nível corresponde a um efeito instantâneo, que se traduz numa relação entre a altura de água na albufeira e o deslocamento. Em geral, quanto maior a altura de água na albufeira maior será o deslocamento que a barragem irá sofrer, na direção de jusante.

Existem várias funções matemáticas adequadas para representar este efeito como é o caso das conhecidas funções polinomiais com vários termos com potências de h , normalmente $a \cdot h^2$, $a \cdot h^3$, $a \cdot h^4$... (não se usa o termo $a \cdot h$ para se ter tangente horizontal em $h=0$ ou seja, derivada nula (Mendes, 2014)). Contudo, tem-se vindo a constatar que se podem obter melhores ajustes utilizando funções exponenciais do tipo $a \cdot (e^{h/c_f} - 1)$, como se mostra na Figura 2.15 onde estão representadas três diferentes funções do tipo exponencial, para se perceber a influência do coeficiente de forma (c_f) na curvatura.

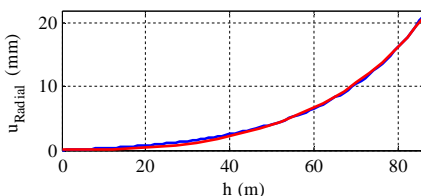


$$u_e^{PH}(h) = a \cdot \left(e^{h/25} - 1 \right) \quad (2.15)$$



MSE — MSE MEF — MEF

$$u_e^{PH}(h) = a \left(e^{h/15} - 1 \right) \quad (2.16)$$



$$u_e^{PH}(h) = a_1 \left(e^{h/25} - 1 \right) + a_2 \left(e^{h/20} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Figura 2.15 - Comparação entre curvas do tipo exponencial representativas do efeito elástico do nível.

Pode-se ver que para valores do coeficiente c_f mais baixos (coeficiente com valor igual a 15) obtém-se uma curvatura mais acentuada.

Na Figura 2.16, apresenta-se, como exemplo, o efeito elástico do nível determinado com base num MSE, referente ao deslocamento radial no topo da abóbada central da barragem da Aguieira.

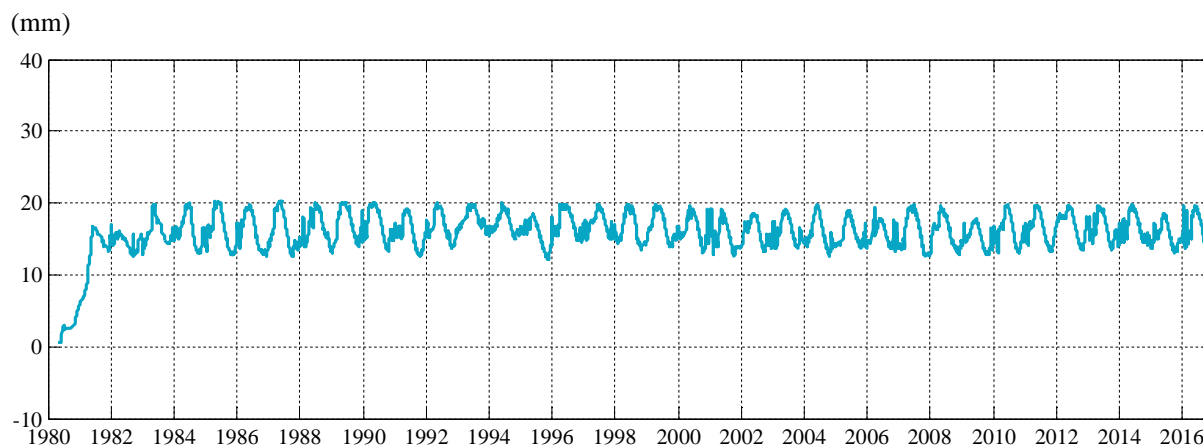


Figura 2.16 - Deslocamento radial (em mm) no topo da abóbada central da barragem da Aguieira. Gráfico correspondente ao efeito elástico do nível entre 1980 e 2016, definido com base num MSE.

2.4.2.2 Efeito de fluência do nível $u_F^{PH}(h,t)$

O efeito de fluência do nível é calculado através da aplicação de coeficientes de fluência aos valores do deslocamento elástico calculados para incrementos mensais da altura de água e efetuando

a respectiva sobreposição (somatório da resposta diferida aos vários patamares correspondentes à discretização mensal do nível de água)

$$u_F^{PH}(h, t) = a \times \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t_j) \left(e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20} \right) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t_j) \left(e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20} \right) \right] \quad (2.18)$$

Na Figura 2.17 a) está representada a discretização do nível da albufeira em patamares e na Figura 2.17 b) apresenta-se a curva do efeito de fluência do nível a qual mostra um aumento gradual do deslocamento ao longo do tempo.

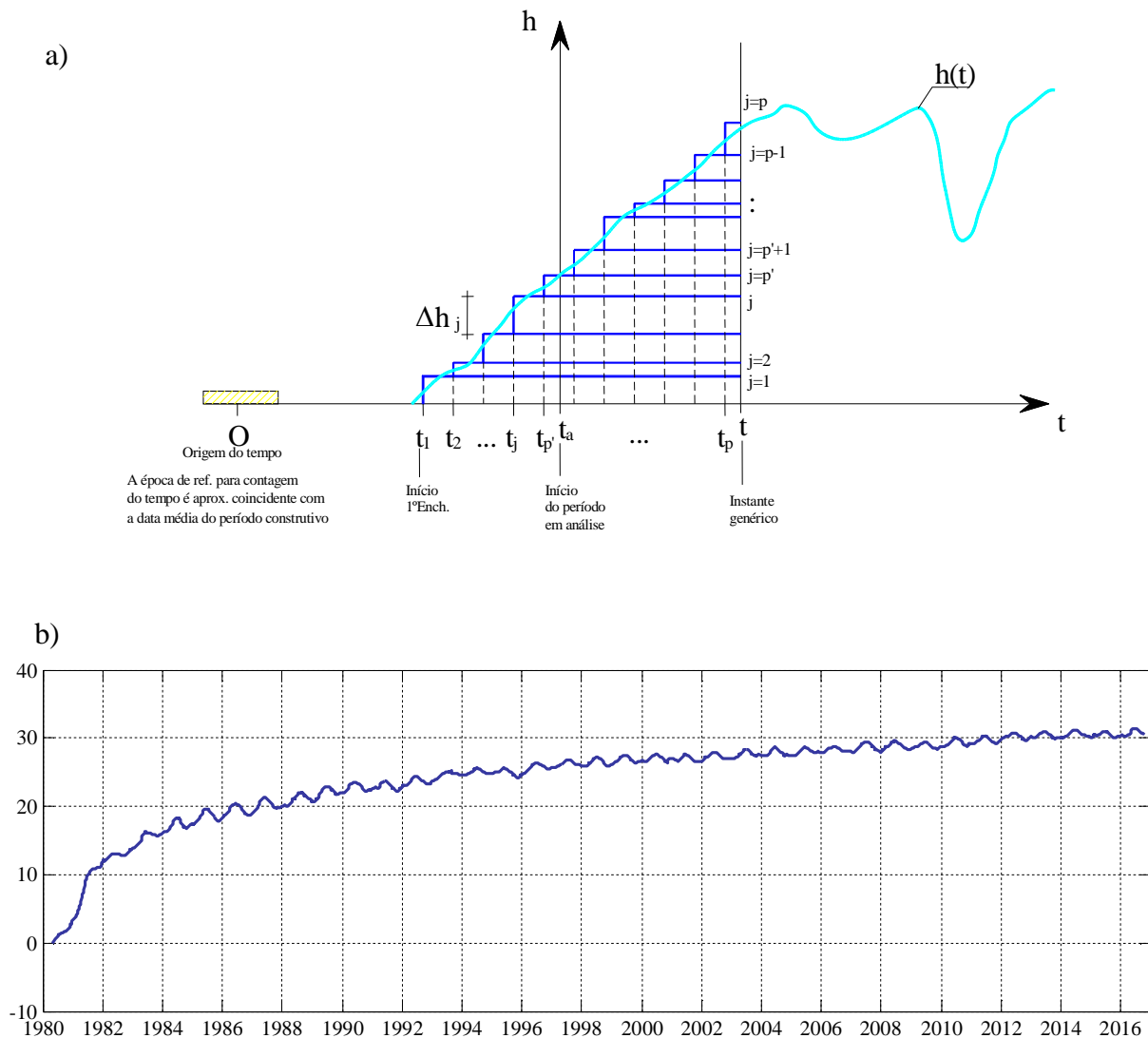


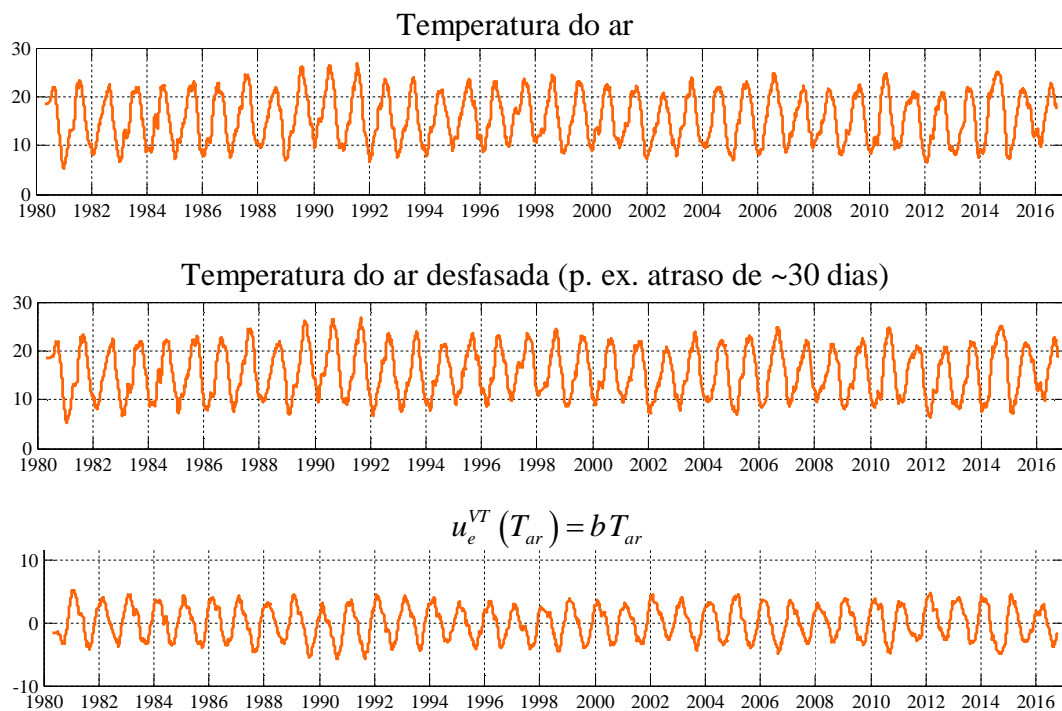
Figura 2.17 - a) Discretização do nível da albufeira em patamares como é exigido pela formulação de MSE, com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática; b) Gráfico do deslocamento do efeito de fluência do nível.

2.4.2.3 Efeito da temperatura $u_e^{VT}(T_{ar})$

O efeito da temperatura pode ser simulado com base nos valores da temperatura do ar registados no local da obra ou com base em funções harmónicas de período anual e/ou semestral.

Utilização direta da temperatura do ar

Após a obtenção dos registos da temperatura do ar, em °C, é usual aplicar em seguida um desfasamento, de aproximadamente 20 a 30 dias, que é aproximadamente o tempo de resposta de uma barragem à variação da temperatura do ar. É usual admitir uma relação linear entre a temperatura desfasada e a resposta em deslocamentos pelo que se multiplica a temperatura do ar por um coeficiente a ajustar pelo MMQ (ver Figura 2.18).



Admite-se que o efeito da temperatura é proporcional à temperatura do ar registada em obra com desfasagem (~30 dias). O parâmetro b é ajustado pelo MMQ.

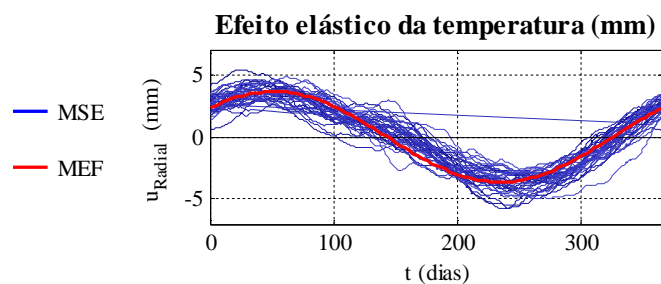


Figura 2.18 - Deslocamento devido ao efeito da temperatura determinada (proporcional à temperatura do ar com uma desfasagem de, aproximadamente, 20 a 30 dias).

Utilização de uma função harmónica

O efeito da temperatura também pode ser simulado através de uma função harmónica de período anual que depende apenas do dia do ano ($0 < \bar{t} < 365,25$ dias), contado a partir de 1 de janeiro.

$$u_e^{VT}(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) \quad (\text{Willm \& Beaujoint, 1967}) \quad (2.19)$$

$(0 < \bar{t} < 365,25 \text{ dias})$

Na Figura 2.19 está representado o deslocamento devido ao efeito da temperatura para um ponto da barragem e o efeito elástico da temperatura ao longo de um ano. Neste caso o efeito elástico da temperatura tem apenas uma curva representada, pois esta toma os mesmos valores todos os anos.

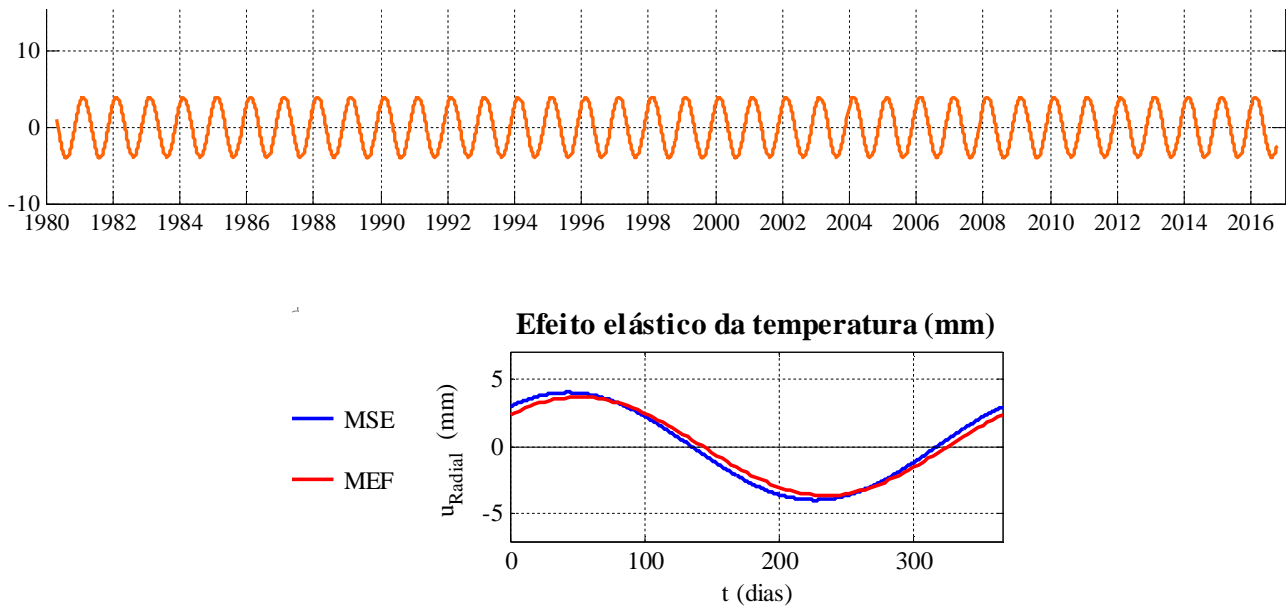


Figura 2.19 - Simulação do deslocamento devido ao efeito da temperatura utilizando uma função harmónica de período anual.

2.4.2.4 Efeito de fluência do peso próprio $u_F^{PP}(t)$

O efeito de fluência do peso próprio corresponde a uma resposta diferida da barragem à ação do peso próprio. O peso próprio é uma força constante (força gravítica) aplicada à estrutura que provoca um efeito de fluência que pode ser estimado com base nos deslocamentos elásticos previstos pelo MEF para a ação do peso e com base no coeficiente de fluência estimado a partir da função de fluência e tendo em conta a idade média do betão da obra.

Na Figura 2.20 estão representadas as duas parcelas, em que a zona a cinzento é a parcela correspondente ao deslocamento devido à fluência (a parcela elástica é estimada pelo MEF).

$$u^{PP}(t) = u_{eMEF}^{PP} + u_F^{PP} = u_{eMEF}^{PP} + \phi(t, t_0)u_{eMEF}^{PP} \quad (2.20)$$

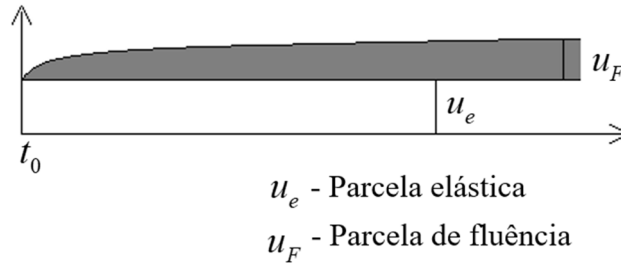


Figura 2.20 - Parcela elástica e de fluência do peso próprio.

A parcela correspondente à fluência do peso próprio é determinada pela seguinte função:

$$u_F^{PP}(t) = \phi(t, t_0)u_{eMEF}^{PP} \quad (2.21)$$

Em que $\phi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência.

O deslocamento devido à parcela de fluência do peso próprio tem uma evolução ao longo do tempo como a que se mostra na Figura 2.21.

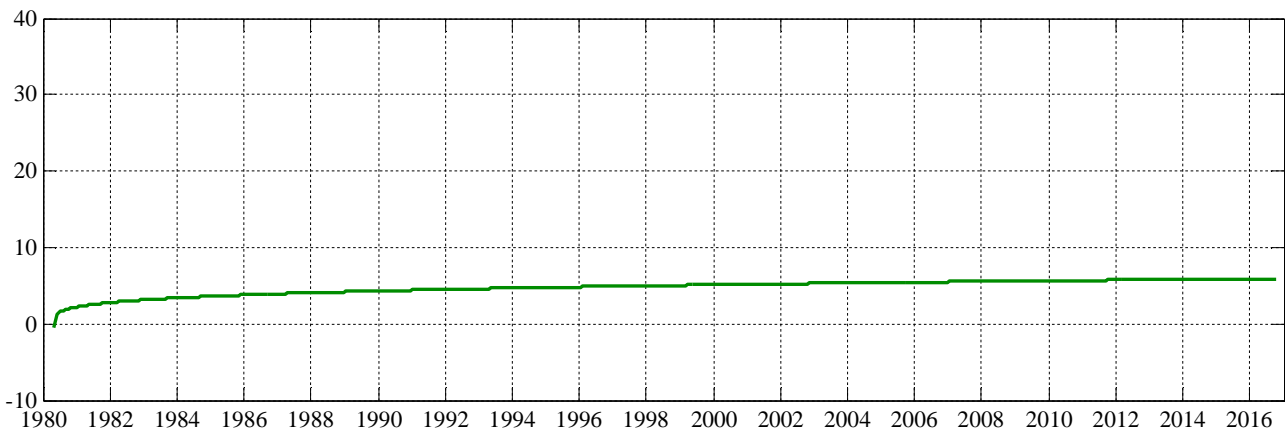


Figura 2.21 - Gráfico do deslocamento do efeito de fluência do peso próprio.

2.4.2.5 Movimentos da fundação $u_{fund}(t)$

Existem barragens que apresentam algum deslocamento na fundação. Para se medir o efeito do deslocamento na fundação utiliza-se a equação mostrada em baixo, multiplicada pelo parâmetro **d**. Este é também um efeito do tempo, pois depende apenas do tempo e é um efeito que provoca alterações irreversíveis na estrutura.

Como é mostrado na Figura 2.22, o efeito do movimento da fundação provoca deslocamentos de forma bastante suave e gradual, com tendência a estabilizar com o tempo.

Através de dados observados chegou-se à conclusão de que poderá existir um ligeiro deslizamento da barragem ao longo do tempo (ao nível da superfície de fundação), no entanto como não afeta de forma significativa os deslocamentos mostrados no capítulo cinco este efeito não será considerado nesse mesmo capítulo, para também facilitar a compreensão dos gráficos não sobrecarregando com informação.

Como é mostrado na Figura 2.22, quando existe deslocamento, neste caso 2 mm, o deslocamento traduz-se numa função com o seguinte andamento.

$$u_{fund}(t) = d \times \log\left(1 + \frac{t}{1000}\right) \quad (2.22)$$

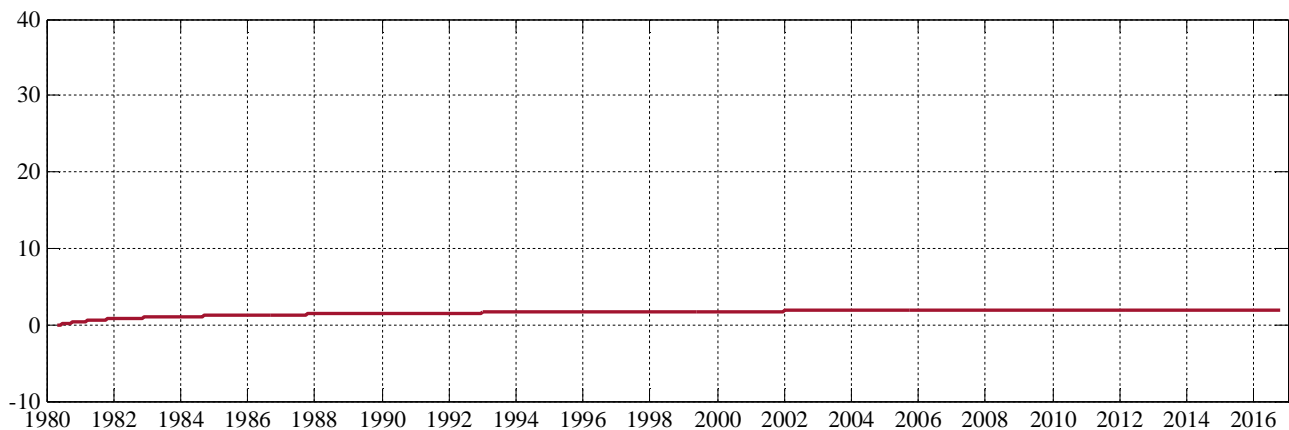


Figura 2.22 - Gráfico do deslocamento do efeito dos movimentos da fundação.

2.4.2.6 Efeito do tempo (Expansões) $u_{exp}(t)$

Como já foi referido anteriormente, existem vários efeitos devido ao tempo. Já foram referidos e caracterizados a fluência do nível, a fluência do peso próprio e os movimentos da fundação, os restantes efeitos do tempo devem-se às expansões no betão.

A função respeitante ao deslocamento provocado pelas ações expansivas pode ser expressa da seguinte maneira:

$$u_{\text{exp}}(t) = c \times \left(1 - e^{-t^n/\beta}\right) \quad (2.23)$$

Em que:

$$\beta = t_{hs}^n \times \frac{n}{n-1} \quad (2.24)$$

$$n = 3,258 \quad (2.25)$$

Esta função tem a forma apresentada no gráfico da Figura 2.23. A curva que traduz o deslocamento provocado pelo efeito das expansões é do tipo sigmóide, ou seja, aumenta devagar ao longo do tempo e quando atinge metade do seu deslocamento muda de curvatura (ponto de inflexão), passando a tender para a estabilização. Neste estudo usou-se o valor de t_{hs} de 8000 dias (h-half; s-swelling), ou seja, o ponto de inflexão dá-se ao fim de 8000 dias (~20 anos).

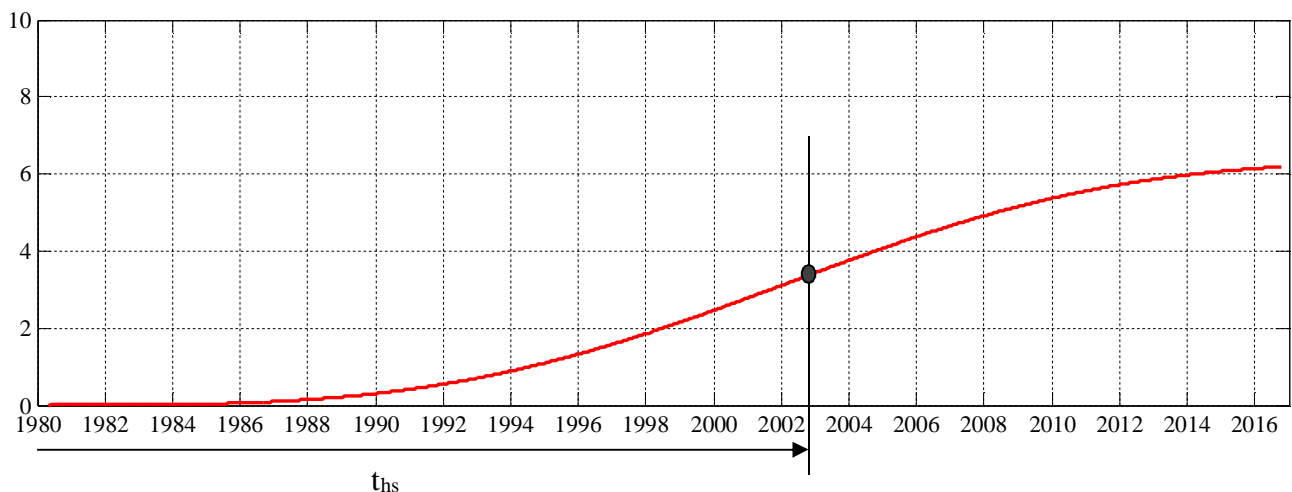


Figura 2.23 - Gráfico do deslocamento do efeito do tempo (Expansões). Ponto de inflexão.

2.4.2.7 Termo independente k

O termo independente k é introduzido para ter em conta que a observação inicial, na primeira época do período em análise, pode assumir um valor qualquer que é “absorvido” pelo termo independente k : os valores das épocas subsequentes são valores que traduzem variações relativamente a esse valor inicial, o qual como se referiu influenciava diretamente o valor da constante k .

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo realçou-se o facto de cada vez ser mais importante uma correta monitorização e observação das estruturas de modo a serem analisadas de forma rigorosa recorrendo a métodos numéricos de elementos finitos e a modelos de separação de efeitos.

Devido ao facto de existirem expansões nas estruturas de betão hoje em dia, em particular nas barragens, é cada vez mais essencial que se consiga estudar os efeitos incidentes nas barragens e, perceber o que cada um provoca na mesma. Neste capítulo abordou-se a importância do controlo e da observação a que devem estar submetidas todas as obras e mostraram-se os resultados obtidos em aparelhos de observação, nomeadamente extensómetros corretores e bases de alongâmetro, que indicam a presença de expansões no betão, que por sua vez provocam fendas na barragem da Aguieira.

Foram apresentados os fundamentos do MEF e da mecânica estrutural, modelo que é utilizado para obtenção de resultados previstos para posterior comparação com o MSE. Fez-se também uma abordagem ao modo como se geram as malhas tridimensionais para aplicação do MEF.

Para terminar este capítulo foram abordadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do modelo de separação de efeitos, a aplicação do método dos mínimos quadrados para determinação dos parâmetros que multiplicam pelo efeito de cada ação, dando relevância à separação dos vários efeitos do tempo, nomeadamente, efeito de fluência do nível, efeito de fluência do peso próprio, efeito do movimento de fundação e efeito das expansões. Com essa separação dos efeitos do tempo será possível, posteriormente, perceber melhor o comportamento da barragem da Aguieira relativamente às expansões.

3

Análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira. Resultados previstos através de modelos numéricos de elementos finitos

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao comportamento estrutural da barragem da Aguieira previstos pelo MEF, que foram obtidos com o módulo MEF do programa **DamSafe3.0**, que se apresenta em detalhe no Capítulo 4. O referido módulo MEF foi desenvolvido anteriormente tendo sido feitas algumas melhorias no âmbito desta dissertação, principalmente em termos gráficos. O programa está preparado para ler os dados em ficheiros no formato .xls (Excel).

Existem vários tipos de ações na barragem, como o peso próprio, a pressão hidrostática, a variação da temperatura, as expansões, entre outras. Através do programa é possível calcular os campos de deslocamentos e de tensões para diversas combinações de ações. Neste caso optou-se por considerar três ações em separado, nomeadamente a ação do Peso Próprio (PP), da Pressão Hidrostática (PH) e das Expansões e ainda a combinação das três ações em simultâneo PP+PH+Expansões.

No ponto 3.2 será apresentada uma descrição da barragem da Aguieira referindo as suas características geométricas, propriedades dos materiais, condições de apoio, e parâmetros para definição das principais ações.

3.1.1 Localização

A barragem da Aguieira situa-se no rio Mondego, entre os distritos de Viseu e de Coimbra. A norte, na albufeira da barragem, situa-se a foz do rio Cris e do rio Dão. Na Figura 3.1 mostra-se a sua localização geográfica.

A barragem foi construída entre 1974 e 1979 e, o seu primeiro enchimento deu-se entre 1980 e 1983 (Gomes & Pina, 2000). Na Figura 3.2 mostram-se elementos e características presentes na barragem da Aguieira.

3.1.2 Geometria e características

A barragem da Aguieira é constituída por três abóbadas de dupla curvatura e dois contrafortes não paralelos. Tem 89 m de altura máxima acima da fundação e 400 m de extensão do coroamento à cota 126,15 m. A área da bacia hidrográfica é de 3100 km² e o caudal de cheia é de 3500 m³/s para um período de retorno de 1000 anos. O volume total de armazenamento da albufeira é de 423 hm³ para o NMC (nível de máxima cheia). Tem dois descarregadores nos contrafortes com uma descarga total do conjunto de 2080 m³/s como caudal máximo descarregado. A descarga de fundo tem um débito máximo de 180 m³/s. Existe ainda uma central no pé da barragem (Brum, 2015).

Na Figura 3.3 estão representados, respetivamente, a planta, o alçado e os cortes da barragem da Aguieira.

Na Figura 3.4 para facilitar a visualização do sistema de juntas da barragem da Aguieira apresenta-se uma representação esquemática tridimensional das principais juntas onde é possível perceber a solução geométrica adotada na zona de encontro entre as abóbodas e os dois contrafortes. Na Figura 3.4 estão representados os descarregadores nos contrafortes, todavia os mesmos não foram considerados nos cálculos pelo MEF.

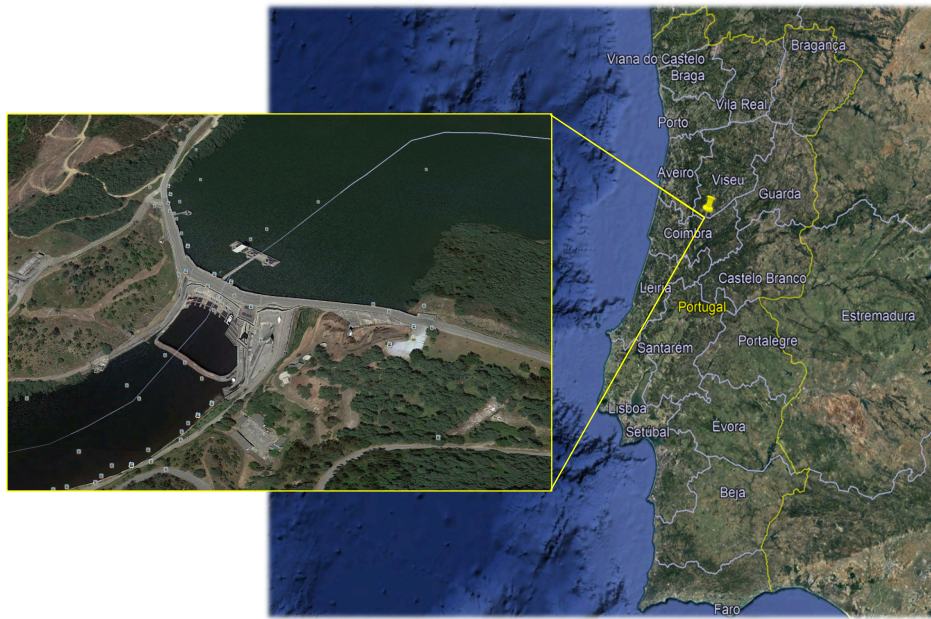


Figura 3.1 - Localização geográfica da barragem da Aguieira.

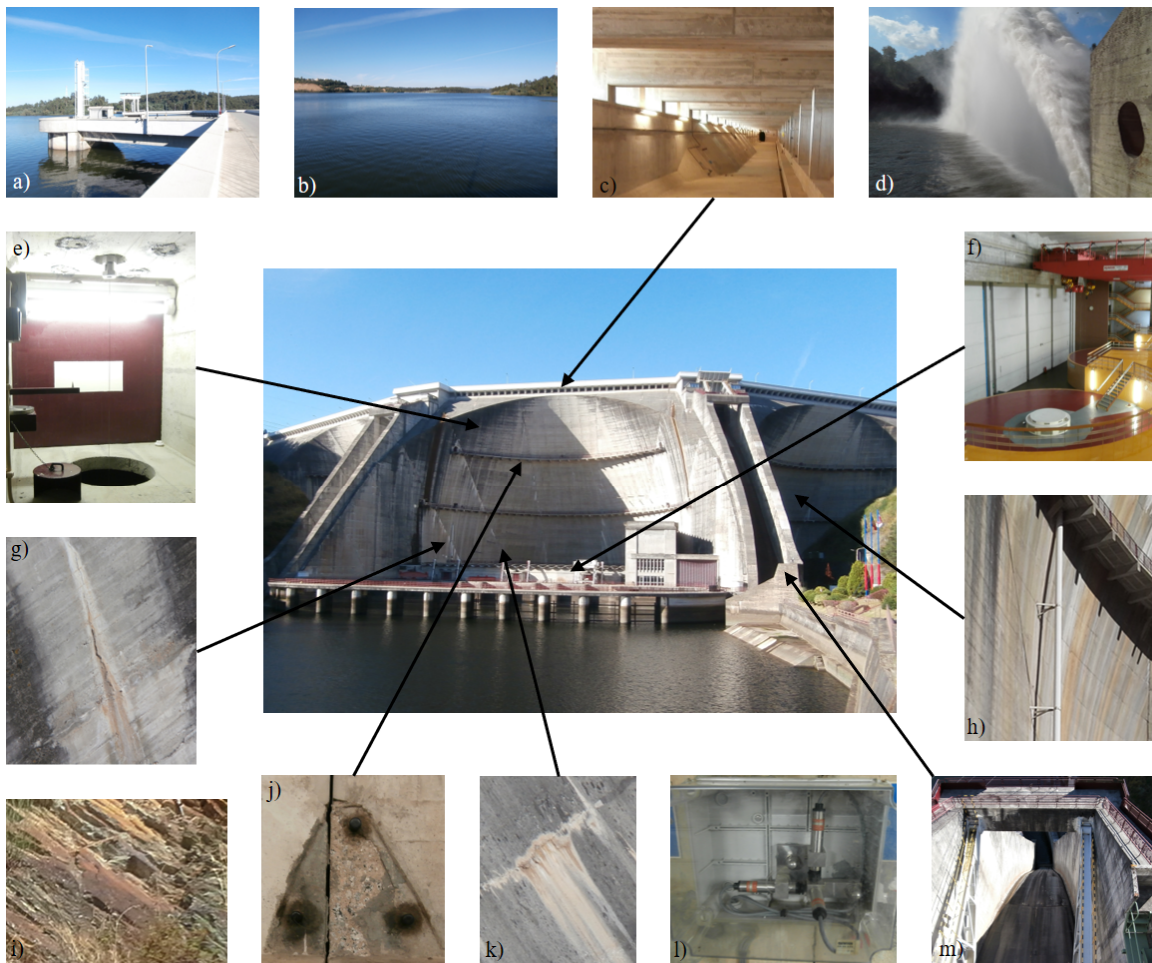


Figura 3.2 - Exemplos de elementos presentes na barragem. a) Lado montante da barragem; b) Albufeira; c) Galeria do coroamento; d) Descarregador de fundo; e) Fio de prumo e respetiva base de coordenómetro; f) Central hidroeléctrica; g) Exemplo de fissura; h) Fio de prumo no exterior; i) Terreno; j) Base de alongâmetro; k) Exemplo de depósitos e repasse no paramento de jusante; l) Medidor de movimento de junta tridimensional; m) Contraforte.

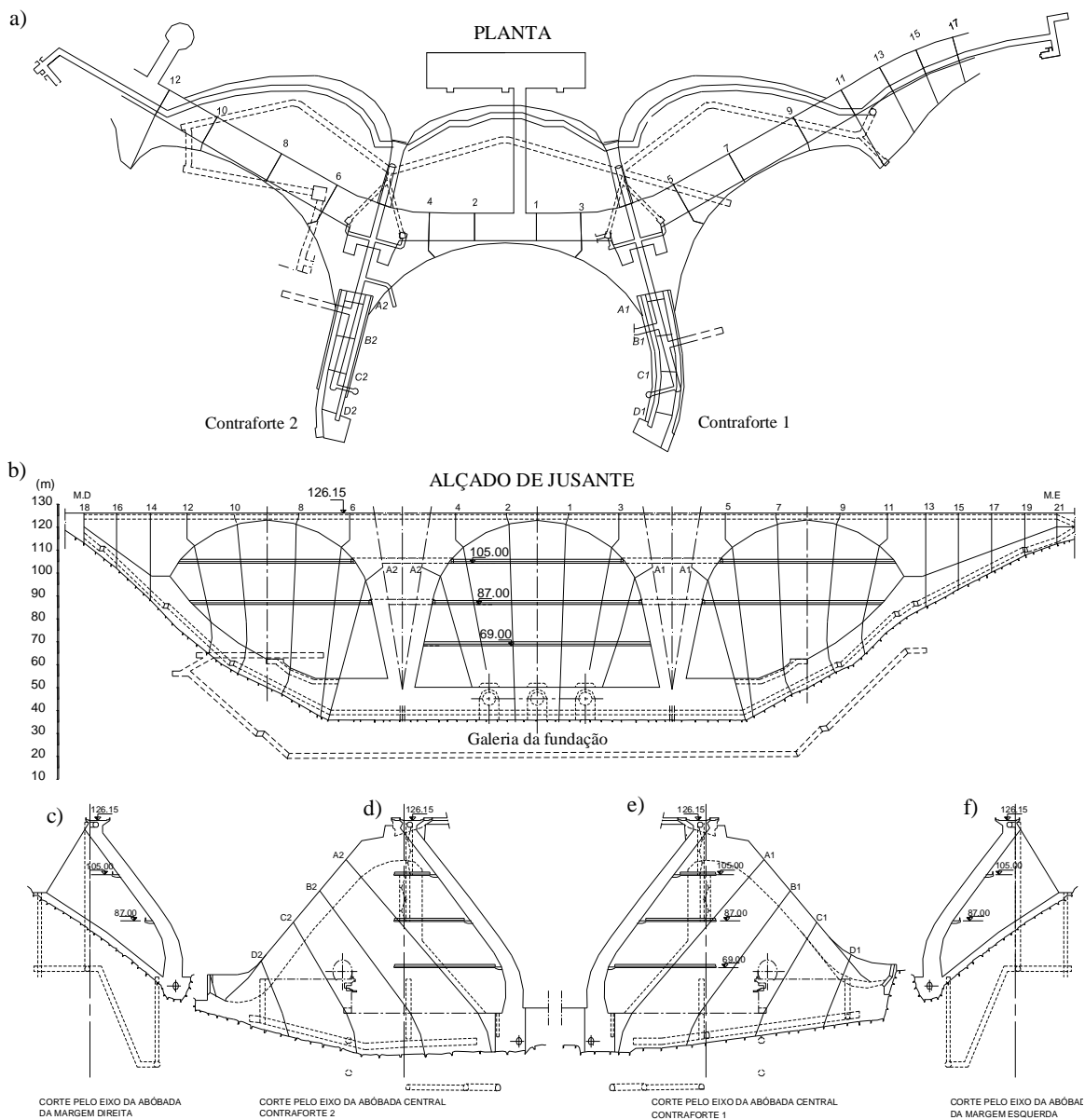


Figura 3.3 - Geometria da barragem da Aguieira (Brum, 2015). a) Planta; b) Alçado; c) Corte pelo eixo da abóbada da margem direita; d) Corte pelo eixo da abóbada central, contraforte 2; e) Corte pelo eixo da abóbada central, contraforte 1; f) Corte pelo eixo da abóbada da margem esquerda.

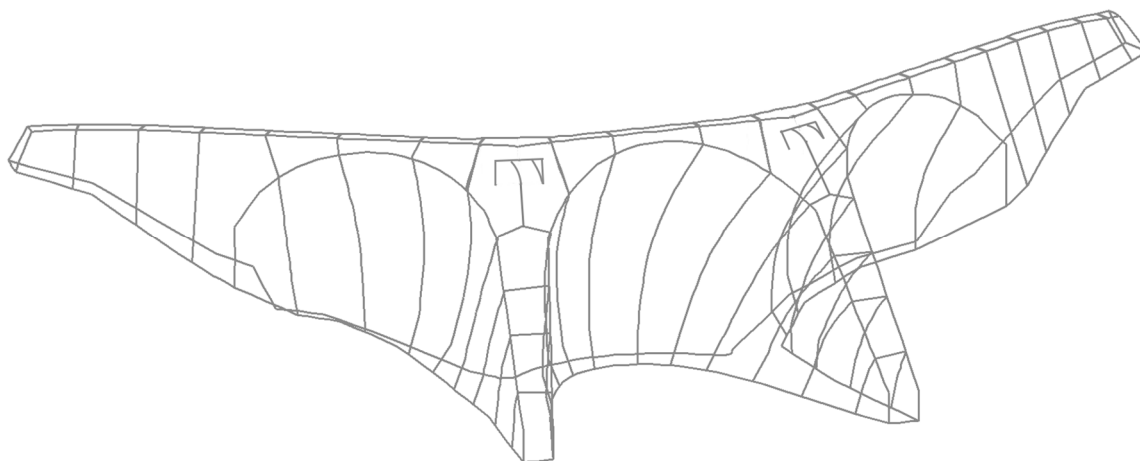
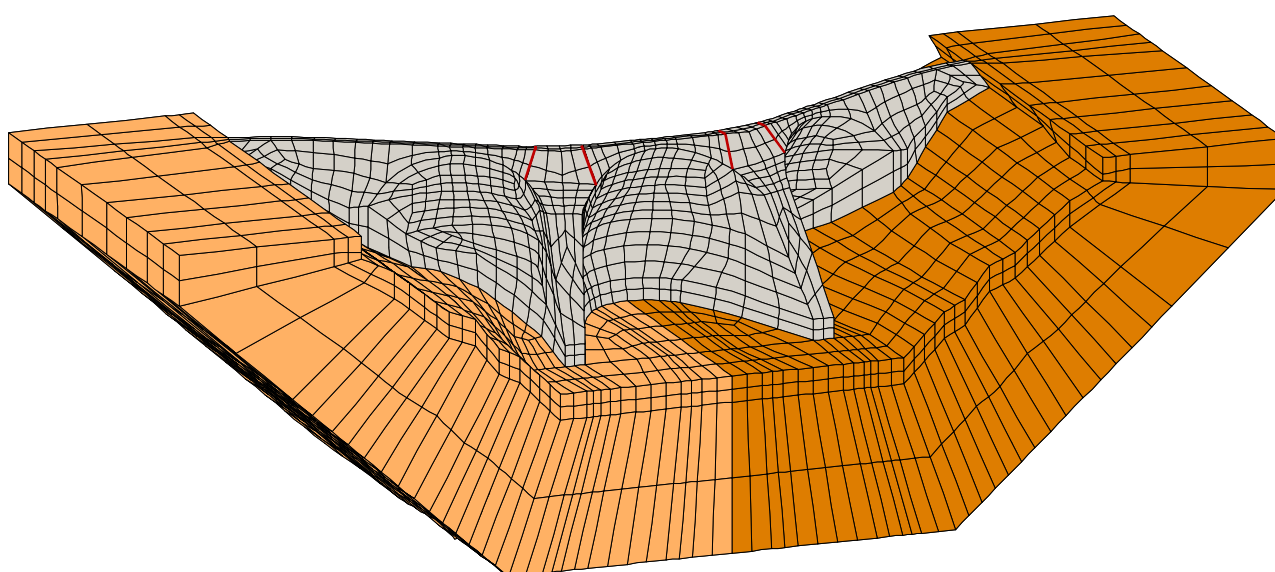


Figura 3.4 - Representação esquemática das principais juntas.




3.1.3 Modelo de elementos finitos desenvolvido

Com vista a analisar o comportamento da barragem foi desenvolvido um modelo de elementos finitos tridimensionais de 20 pontos nodais tendo sido adotada uma discretização da barragem e de um bloco de fundação adjacente. Nas abóbadas consideraram-se dois elementos em espessura, o que conduziu a uma malha com 3776 elementos (1440 no corpo da barragem) e 20021 pontos nodais (60063 graus de liberdade). Admitiu-se a hipótese de continuidade estrutural nas abóbadas e nos contrafortes tendo-se considerado quatro juntas ao nível do coroamento no contacto entre as abóbadas e os contrafortes como se indica na discretização apresentada na Figura 3.5.

Discretização em EF3D (tipo cubo, isoparamétricos do 2º grau, com 20 pontos nodais)



Propriedades dos materiais. Deformabilidade sob ações estáticas

	Betão:	$E_b = 35 \text{ GPa}$	$\nu_b = 0,2$
	Fundação (zona 1):	$E_{f1} = 17,5 \text{ GPa}$	$\nu_{f1} = 0,2$
	Fundação (zona 2):	$E_{f2} = 12,5 \text{ GPa}$	$\nu_{f2} = 0,2$

Discretização em EF3D

Número de pontos nodais: 20021 (60063 Graus de liberdade)
Número de elementos: 3776 (1440 no corpo da barragem)
(Integração numérica com 27 pontos de Gauss por elemento)

Figura 3.5 - Discretização da barragem e da fundação em elementos finitos tridimensionais isoparamétricos com 20 pontos nodais. Propriedades dos materiais considerando um zonamento da fundação de acordo com as características de deformabilidade identificadas através de ensaios *in-situ* (LNEC, 1974).

A barragem está fundada num maciço rochoso constituído por xistos e grauvaques. Como se pode ver na Figura 3.5, a fundação não tem toda as mesmas características, sendo a margem direita (zona 1) menos deformável do que a margem esquerda (zona 2), ou seja, a margem direita tem um módulo de elasticidade de $E_{f1} = 17,5 \text{ GPa}$ e a margem esquerda de $E_{f2} = 12,5 \text{ GPa}$.

3.1.4 Principais ações

3.1.4.1 Pressão hidrostática e variações térmicas

Na barragem da Aguieira estão presentes as ações relativas à variação do nível da água (força aplicada), à variação da temperatura do ar e às expansões (ambas deformações impostas). A altura da água atinge valores máximos de 85 m e tem uma variação sazonal com uma amplitude de cerca de 10 m, chegando aproximadamente aos mínimos de 75 m, ou seja, atingindo os mínimos nos meses de outubro/novembro e os máximos nos meses de abril/maio. Pode-se constatar, relativamente à temperatura do ar, que o seu comportamento também é sazonal, como seria previsto, com uma oscilação aproximadamente entre 7°C de mínima e 26°C de máxima. Na Figura 3.6 mostra-se a evolução ao longo do tempo das ações, na barragem da Aguieira.

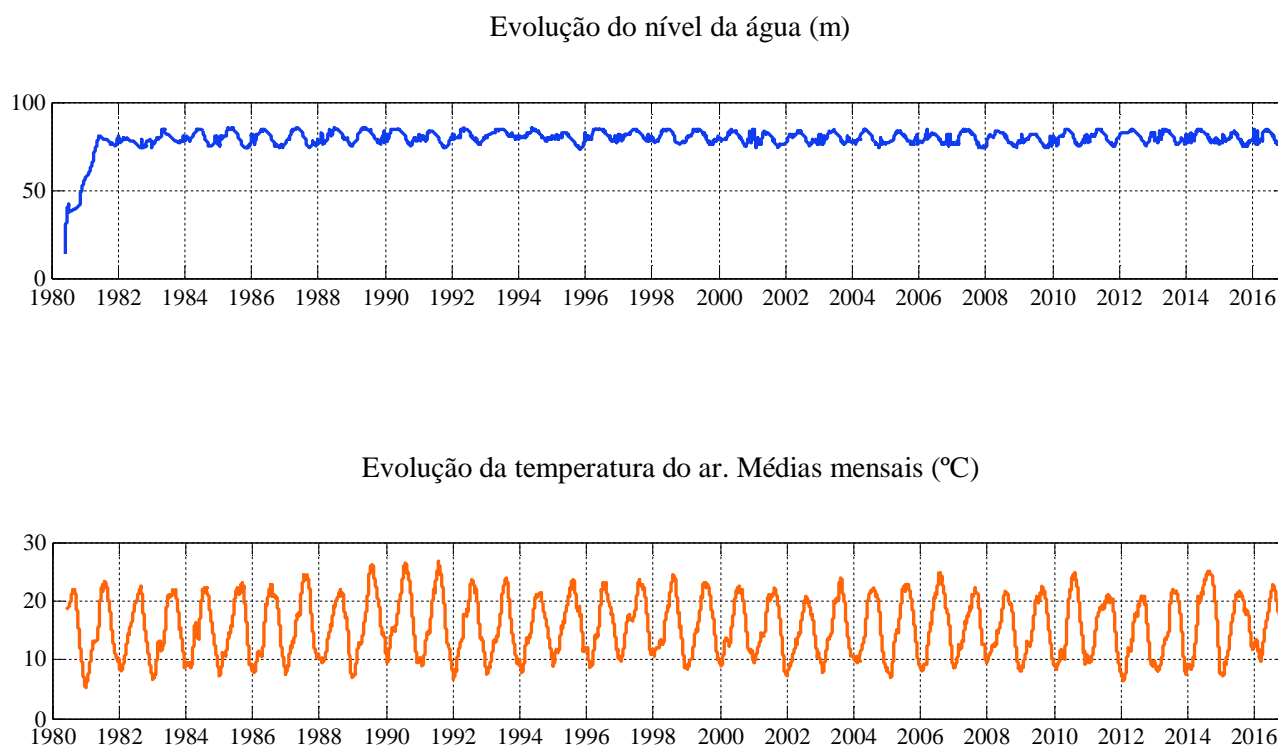
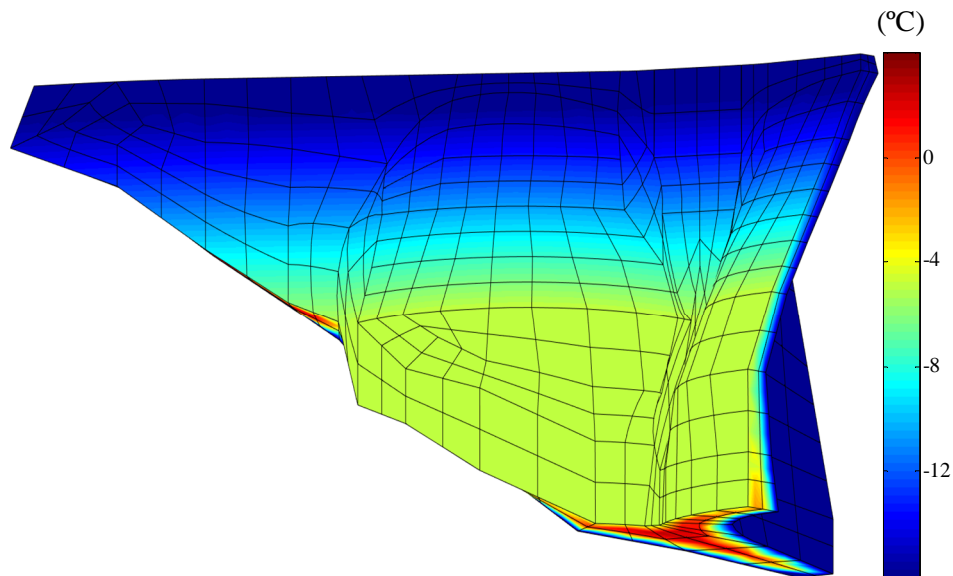


Figura 3.6 - Evolução das principais ações ao longo do tempo (Nível da água e Temperatura do ar).

Na Figura 3.7 pode-se ver a variação de temperatura tanto no arrefecimento (entre início de agosto e final de janeiro) como no aquecimento (entre final de janeiro e início de agosto). Como se pode ver na Figura 3.7 a) no interior da barragem existem temperaturas mais altas do que no exterior e a temperatura nas faces é inferior nas zonas superiores da barragem. Na Figura 3.7 b) o comportamento é contrário, ou seja, a zona interior da barragem tem temperaturas mais baixas do que as faces e nas zonas superiores da barragem a temperatura é maior do que nas zonas inferiores.

a)Variação térmica. Arrefecimento entre o início de agosto e final de janeiro



b)Variação térmica. Aquecimento entre o final de janeiro e início de agosto

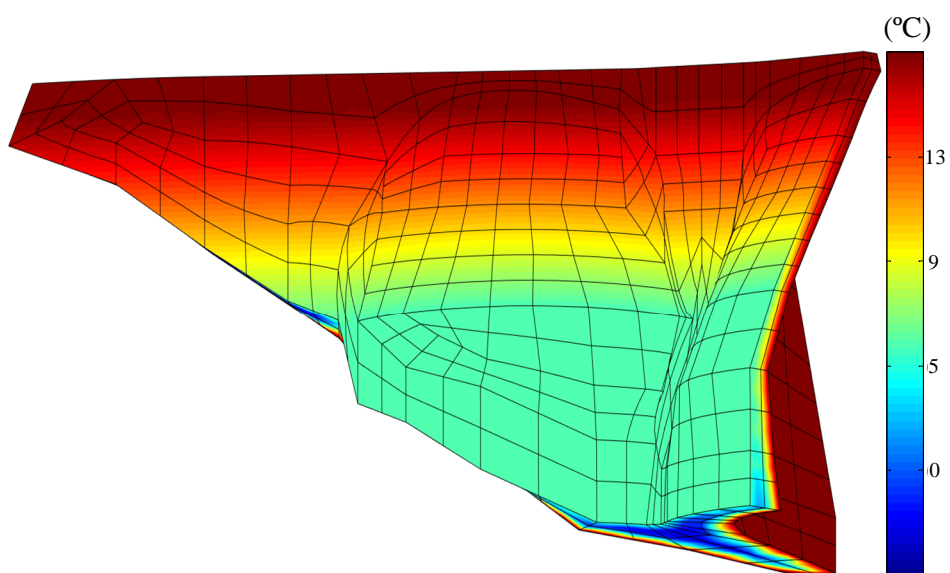


Figura 3.7 - Variação de temperatura considerada. a) Arrefecimento entre o início de agosto e final de janeiro; b) Aquecimento entre o final de janeiro e início de agosto.

3.1.4.2 Ação expansiva

A ação expansiva resulta de um processo químico que provoca um aumento de volume que se traduz não numa força mas numa deformação imposta tal como a temperatura. As variações de temperatura tal como se viu anteriormente correspondem a variações de volume, aumento nas épocas quentes e diminuição nas épocas frias, enquanto a expansão corresponde a uma ação que envolve um aumento de volume progressivo, cuja taxa de crescimento após atingir um valor máximo tenderá a anular-se a longo prazo, como já foi referido atrás. Na Figura 3.8 mostra-se a evolução ao longo do tempo das extensões medidas em quatro extensómetros corretores (Mendes, 2014) localizados nas abóbadas laterais junto aos contrafortes, onde se pode ver o aumento progressivo das extensões.

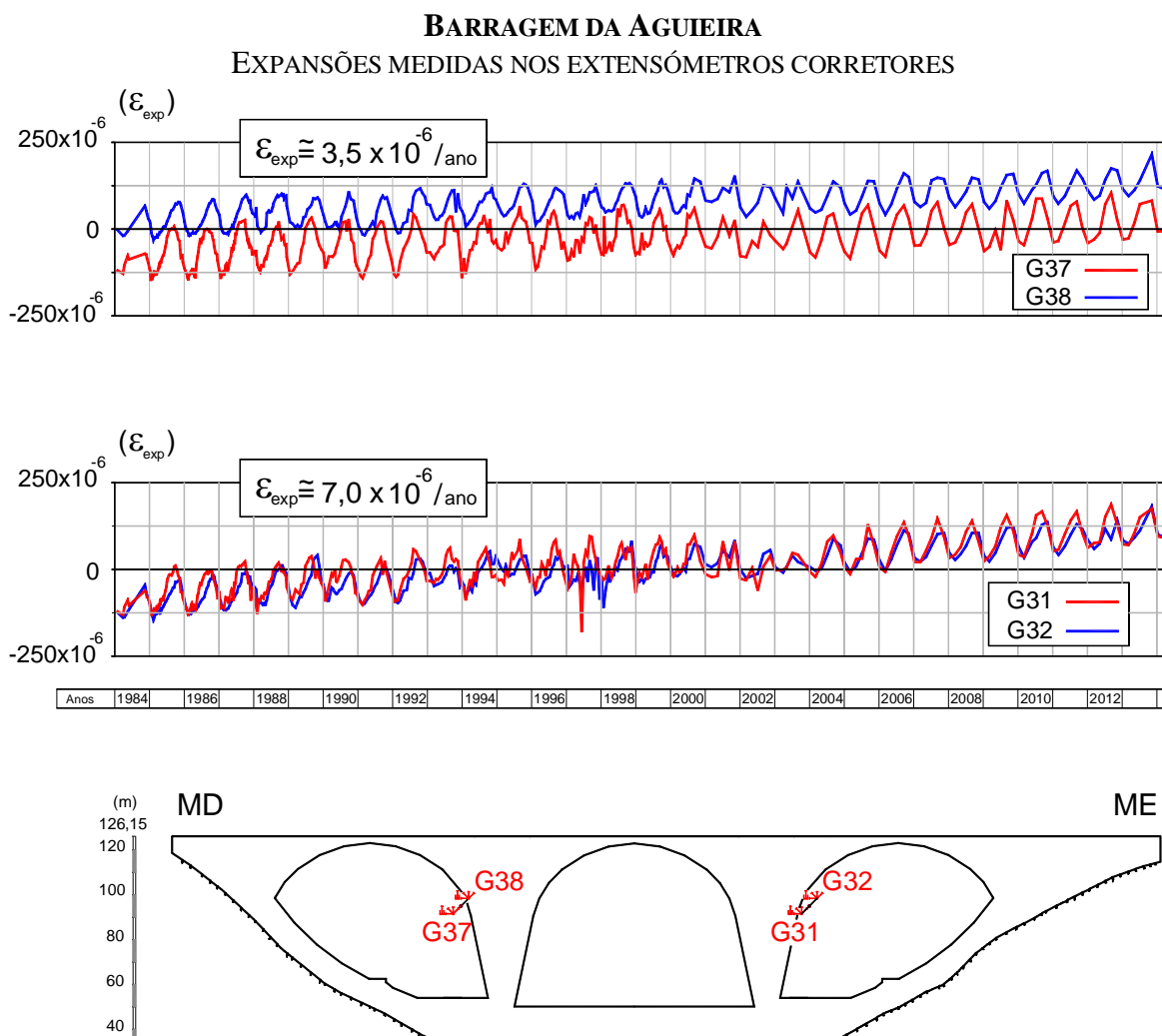


Figura 3.8 - Evolução ao longo do tempo das extensões medidas em quatro extensómetros corretores entre 1984 e 2013 (Mendes, 2014).

Por sua vez, na Figura 3.9 mostra-se a evolução ao longo do tempo dos deslocamentos verticais em dois extensómetros de varas (verticais) instalados nos encontros que indicam um aumento dos

deslocamentos verticais, ou seja, pressupõe a existência de reações expansivas da ordem de $1 \times 10^{-6} / \text{ano}$ no encontro da margem direita e $4,5 \times 10^{-6} / \text{ano}$ no encontro da margem esquerda (Mendes, 2014).

BARRAGEM DA AGUIEIRA

EXPANSÕES MEDIDAS NOS EXTENSÓMETROS DE VARAS INSTALADOS NOS ENCONTROS

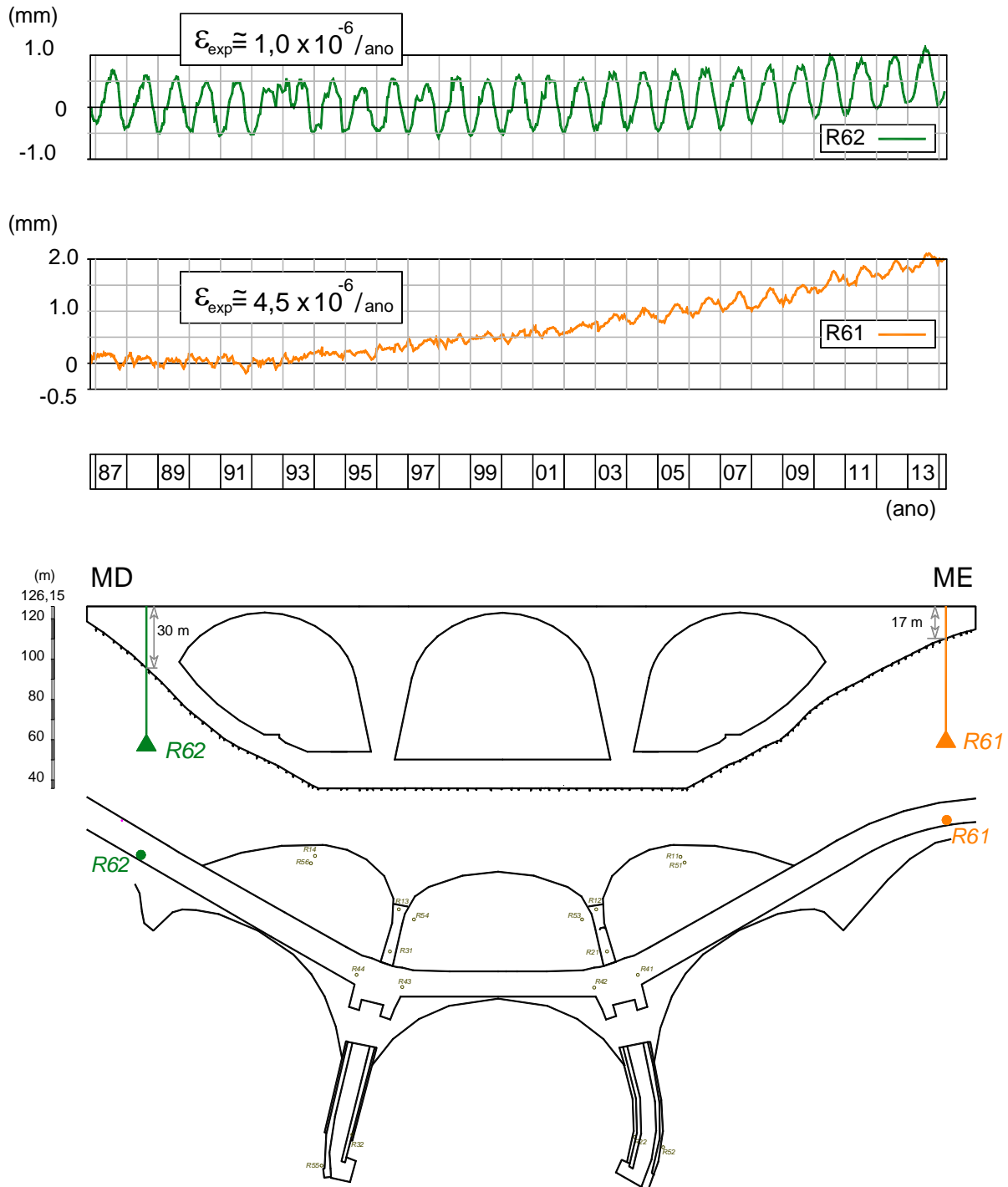


Figura 3.9 - Evolução ao longo do tempo dos deslocamentos verticais em dois extensômetros de varas (verticais) instalados nos encontros. O aumento dos deslocamentos verticais indicia a ocorrência de reações expansivas da ordem de $\epsilon_{exp} = 1 \times 10^{-6} / \text{ano}$, no encontro da margem direita, e $\epsilon_{exp} = 4,5 \times 10^{-6} / \text{ano}$, no encontro da margem esquerda (Mendes, 2014).

Na Figura 3.10 apresentam-se os valores das expansões observadas nos extensômetros corretores entre os anos de 1984 e 2016. Na Figura 3.11 são apresentados os valores calculados das expansões devidas a reações álcali-sílica (RAS) a partir dos resultados da temperatura e da humidade no betão. A evolução ao longo do tempo dos campos de temperatura e de humidade no corpo da barragem foi calculada com o programa **PAT2.0** (Leitão, 2012). Para cálculo das expansões foi utilizado o programa **Expand2014** (Gomes J. P., 2007), o qual permite calcular para cada ponto do betão a evolução ao longo do tempo da expansão tendo em conta as histórias de temperatura e humidade nesse ponto e a energia de ativação característica e de lactência do betão, o tempo característico e o tempo de lactência e o valor da expansão final a tempo infinito (valores dependentes da composição química dos agregados e do cimento nomeadamente das quantidades de álcalis e sílica).

Comparando os valores das expansões medidas *in situ* nos extensômetros corretores apresentados na Figura 3.10 com os valores calculados com o programa **Expand2014** apresentados na Figura 3.11, pode-se verificar um bom acordo entre os resultados experimentais e os calculados numericamente.

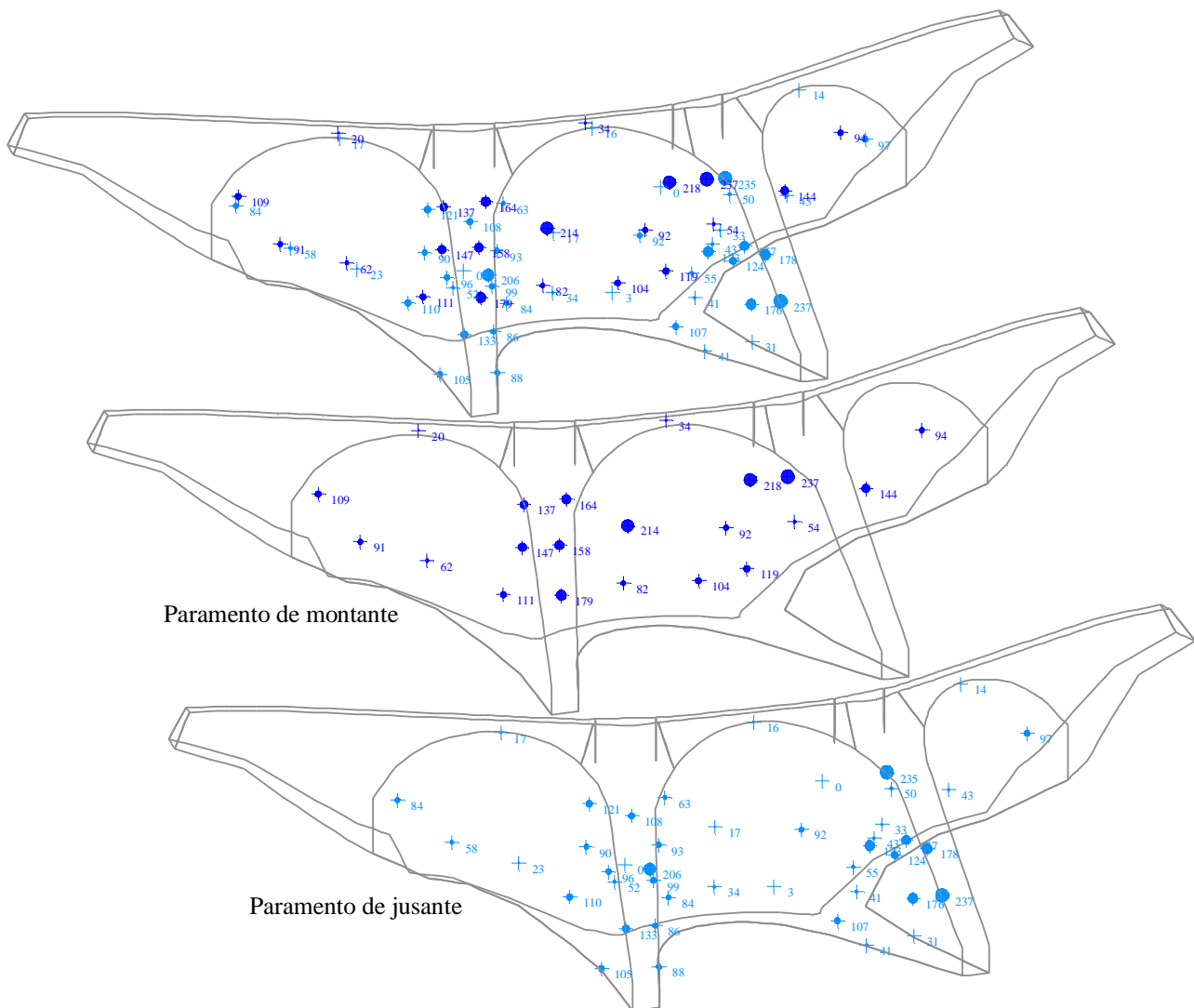


Figura 3.10 - Expansões entre 1984 e 2016. Valores observados nos extensômetros corretores.

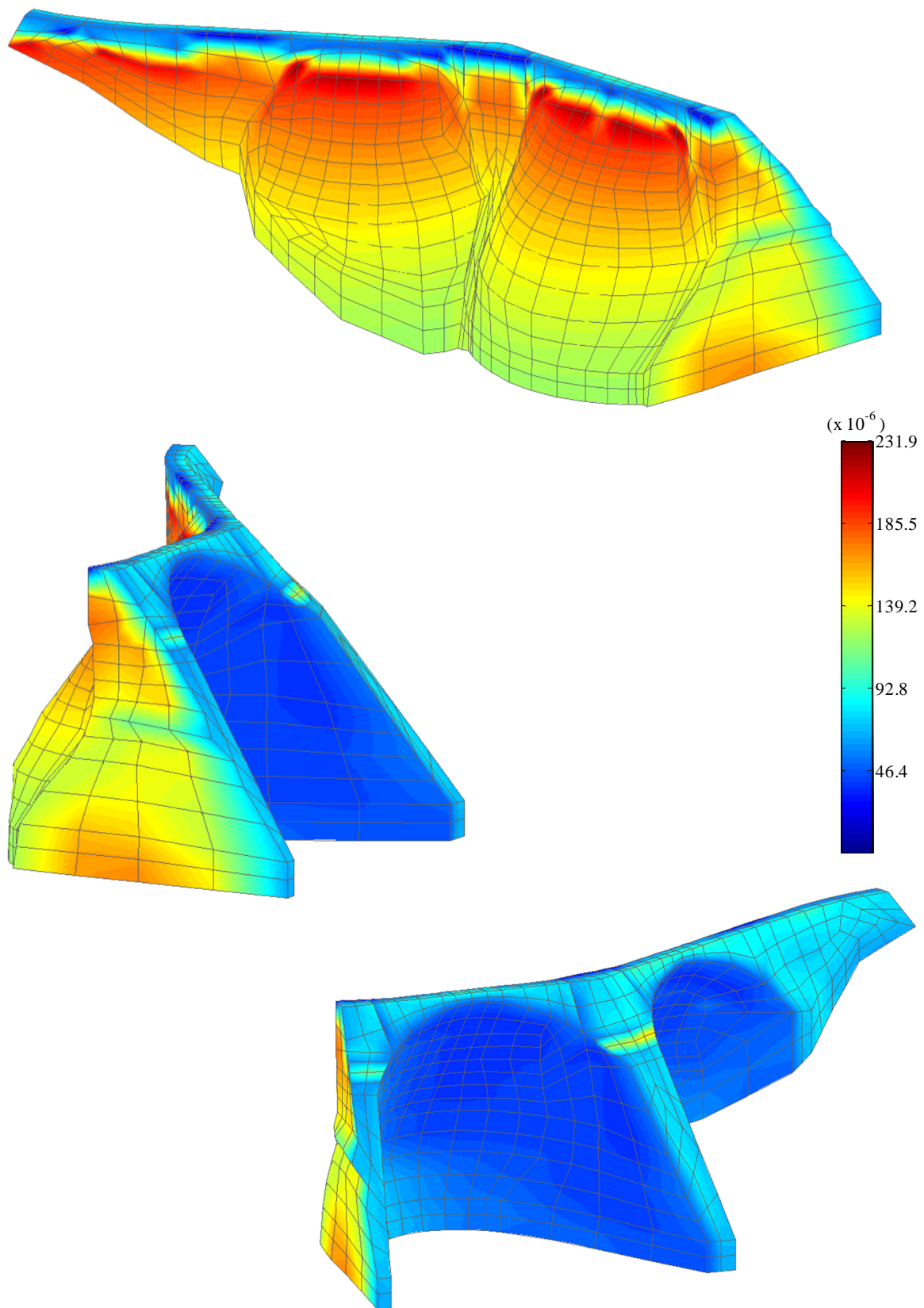


Figura 3.11 - Expansões acumuladas entre 1984 e 2016. Valores calculados (Gomes J. P., 2007) tendo em conta a temperatura e a humidade no betão, calculadas pelo MEF.

3.1.5 Características do betão, respetivas curvas de fluência e coeficientes de fluência

Devido às propriedades viscoelásticas do betão é importante referir que pode ocorrer aumento de deslocamento ao longo do tempo para forças constantes no tempo, como é o caso do peso próprio (fluência do peso próprio). Assim, mostra-se de seguida as características do betão adotado para os cálculos efetuados na Figura 3.12 e Figura 3.13. Quanto à composição do betão é de referir que os agregados grossos ($D_{máx}=150$ mm) são de granito e que o ligante é constituído apenas por cimento (sem cinzas), com uma dosagem de 225kg/m^3 (1:c:a:ag:gr:fi \Leftrightarrow 1:1:0,5:9,4:7,6:1,8) (Mora Ramos, 1985). Para simular o comportamento diferido do betão, foi considerada uma lei de fluência obtida a partir da inicialmente estimada com base em ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado (Mora Ramos, 1985), admitindo que devido ao desenvolvimento do processo expansivo ocorrem alterações ao nível das propriedades de fluência do betão, nomeadamente, admitiu-se que a fluência do betão integral sujeito a reações expansivas ao longo de mais de três décadas seria significativamente maior, cerca do dobro, da inicialmente estimada em provetes intactos de betão crivado (Figura 3.13 a)). Em trabalhos recentes foi identificada uma correlação entre a progressão das expansões e o decréscimo das propriedades mecânicas do betão (Esposito, R. et al., 2016) o que indicia também que deverá existir uma correlação entre o desenvolvimento das expansões e a deformabilidade diferida do betão, tal como se pretende simular neste trabalho através da consideração de uma maior fluência para o betão da barragem da Aguieira do que a inicialmente estimada em provetes intactos de betão crivado. Neste trabalho, nos cálculos efetuados pelo MEF para a barragem da Aguieira, foi utilizado o módulo de elasticidade do betão com o valor de 35 GPa, como é mostrado na Figura 3.12.

$$\text{Evolução do módulo de elasticidade: } E(t) = E_0 / \left[1 + 0,1^n \varphi_1 (t^{-m} + \beta) \right]$$

$$E_0 = 41,5 \text{ GPa} \quad \varphi_1 = 1,6 \quad \beta = 0,05 \quad m = 0,33 \quad n = 0,22$$

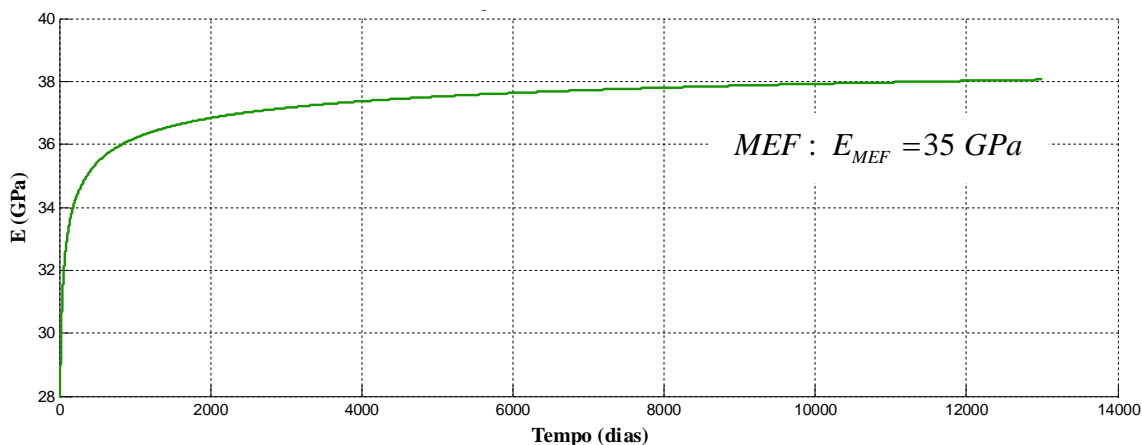
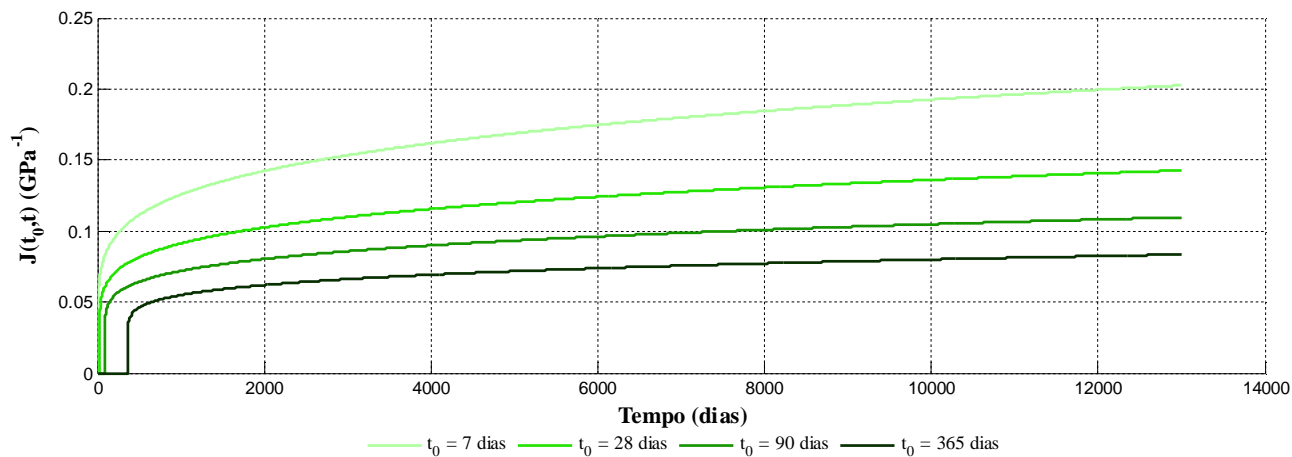


Figura 3.12 - Evolução do módulo de elasticidade do betão da barragem da Aguieira. Curva estimada a partir de ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado e valor adotado no MEF (valor médio para o betão).

a) **Função de fluência:** $J(t, t_0) = \left[1 + \varphi_1 (t_0^{-m} + \beta)(t - t_0)^n \right] / E_0$ (Bazant & Panula, 1979)

$$E_0 = 41,5 \text{ GPa} \quad \varphi_1 = 1,6 \quad \beta = 0,05 \quad m = 0,33 \quad n = 0,22$$



b) **Coefficientes de fluência:** $\phi(t, t_0) = E(t) \cdot J(t, t_0) - 1$

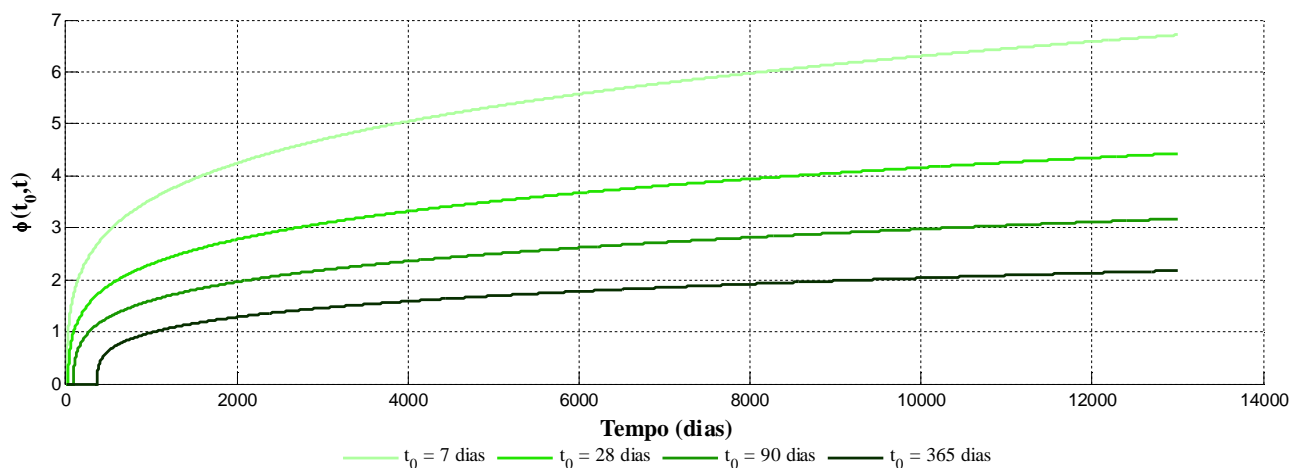


Figura 3.13 - Barragem da Aguieira. Função de fluência adotada admitindo que a fluência do betão integral após mais de três décadas de expansão é maior do que a inicialmente estimada em provetes intactos de betão crivado (Mora Ramos, 1985). a) Função de fluência; b) Curvas representativas do coeficiente de fluência.

3.2 Resultados do MEF

Neste subcapítulo são mostrados os resultados previstos pelo MEF relativamente aos deslocamentos e às tensões, para as diferentes ações já mencionadas anteriormente.

3.2.1 Ação do Peso Próprio

3.2.1.1 Deslocamentos

Na Figura 3.14 pode-se compreender, em termos de deslocamentos, o comportamento da barragem quando sujeita à ação do peso próprio.

Na Figura 3.14 a), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo de 2,43 mm para montante, o que já era expectável tendo em consideração a geometria da barragem. A zona da barragem com maior deslocamento é no topo da abóbada central.

Na Figura 3.14 b), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 5,23 mm no sentido negativo (para baixo), que também era previsto uma vez tratar-se do peso próprio. A zona da barragem com maior deslocamento é também no topo da abóbada central.

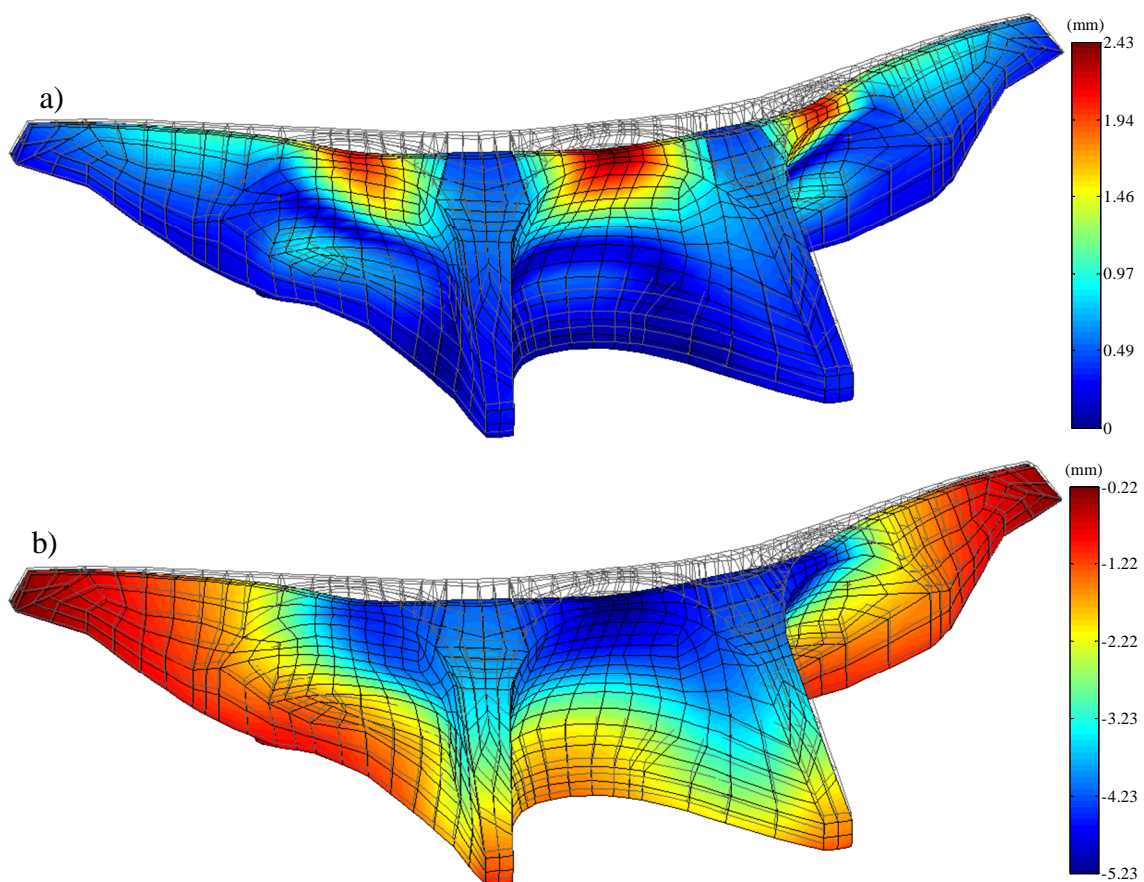


Figura 3.14 - Deslocamentos associados ao peso próprio, calculados pelo MEF. a) Horizontais; b) Verticais.

Na Figura 3.15 mostra-se os deslocamentos globais, horizontais e verticais no paramento de montante em forma vetorial. Esta é outra forma de se representar o comportamento da barragem.

Na Figura 3.15 a), correspondente aos deslocamentos globais, tem-se um valor máximo de 5,55 mm para baixo e montante. A zona da barragem com maior deslocamento é no topo da abóbada central. Na Figura 3.15 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo de 2,40 mm para montante, o que corresponde à Figura 3.14 a), com os máximos a ocorrerem na mesma zona. Na Figura 3.15 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 5,02 mm negativos, que corresponde à Figura 3.14 b), com os máximos a ocorrerem também na mesma zona.

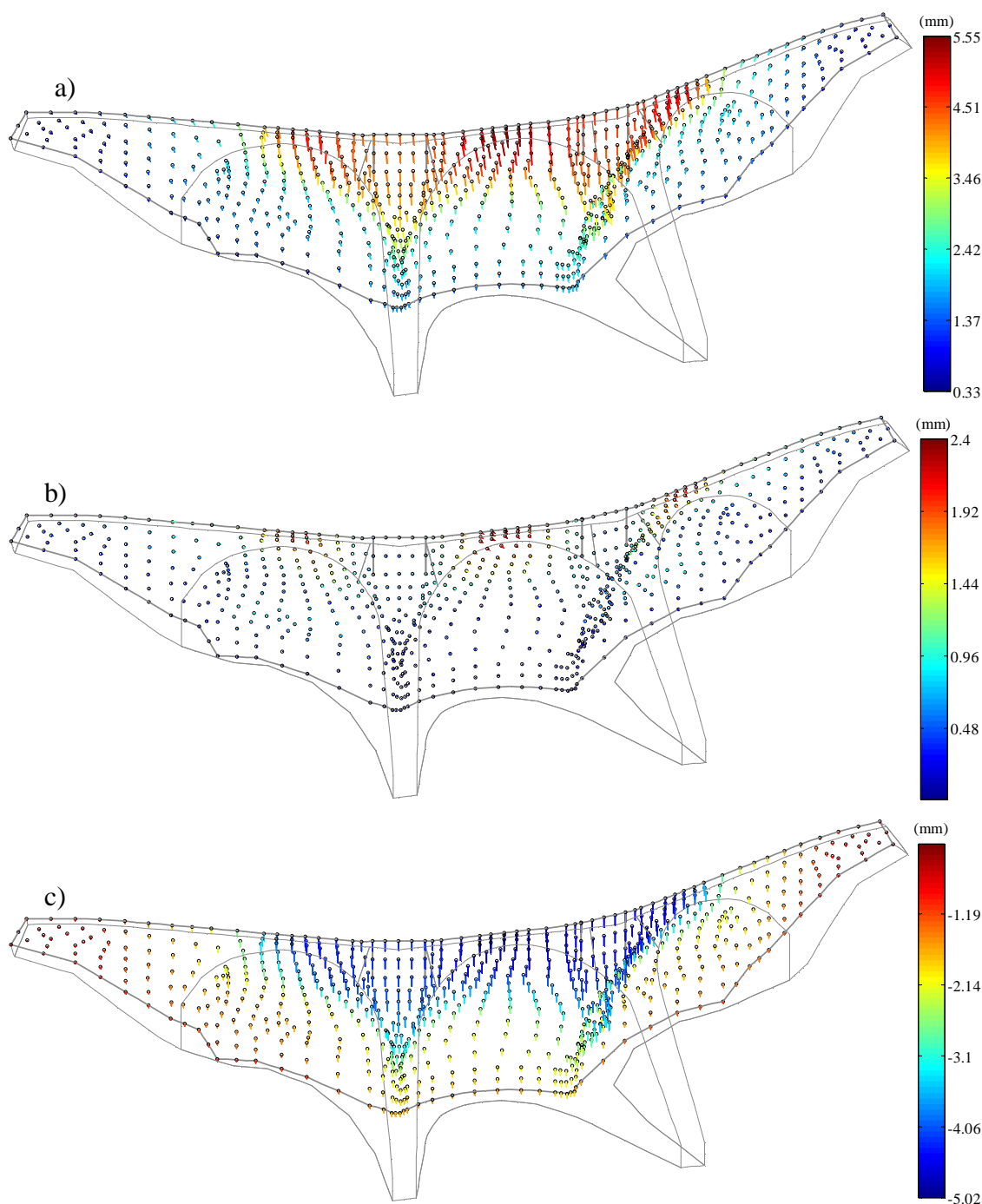


Figura 3.15 - Deslocamentos no paramento de montante associados ao PP. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

Na Figura 3.16 tem-se os deslocamentos globais, horizontais e verticais no paramento de jusante em forma vetorial.

Na Figura 3.16 a), correspondente aos deslocamentos globais, tem-se um valor máximo de 5,73 mm para baixo e montante. A zona da barragem com maior deslocamento é no topo da abóbada central e parte do topo das abóbadas laterais. Na Figura 3.16 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo de 2,43 mm para montante, tal como nos exemplos anteriores, com os máximos a ocorrerem nas mesmas zonas. Na Figura 3.16 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 5,23 mm negativos, que corresponde à Figura 3.14 b), com os máximos a ocorrerem também na mesma zona.

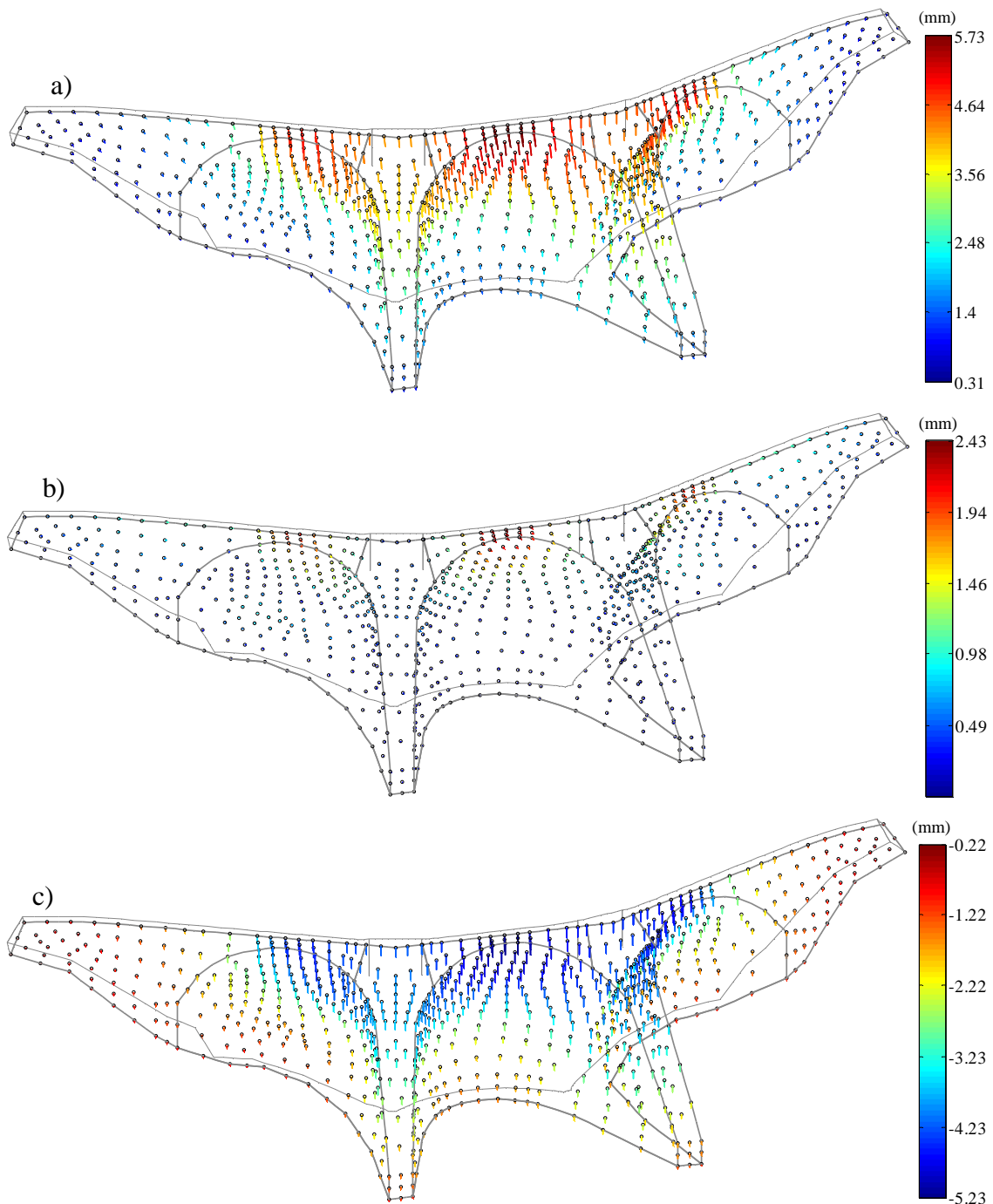


Figura 3.16 - Deslocamentos no paramento de jusante associados ao PP. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

3.2.1.2 Tensões

Relativamente às tensões estas serão mostradas, para cada paramento, na Figura 3.17. As tensões negativas (compressão) têm tons azuis e as tensões positivas (tração) têm tons encarnados.

Pode-se ver na Figura 3.17 a), paramento de montante, compressões em quase todo o paramento com valor máximo a ocorrer no pé da barragem (sentido vertical) e no topo das abóbadas (sentido do arco), o valor máximo de compressão é de -2,03 MPa. Nas zonas centrais de cada abóbada existem trações (sentido do arco) e o valor máximo de tração é de 0,70 MPa.

Na Figura 3.17 b), paramento de jusante, existem compressões também em quase todo o paramento com valor máximo nos contrafortes. Na zona central das abóbadas as compressões têm o sentido dos arcos. O valor máximo de compressão é de -2,08 MPa. As trações ocorrem na zona dos encontros (sentido do coroamento) e têm um valor máximo de 0,46 MPa.

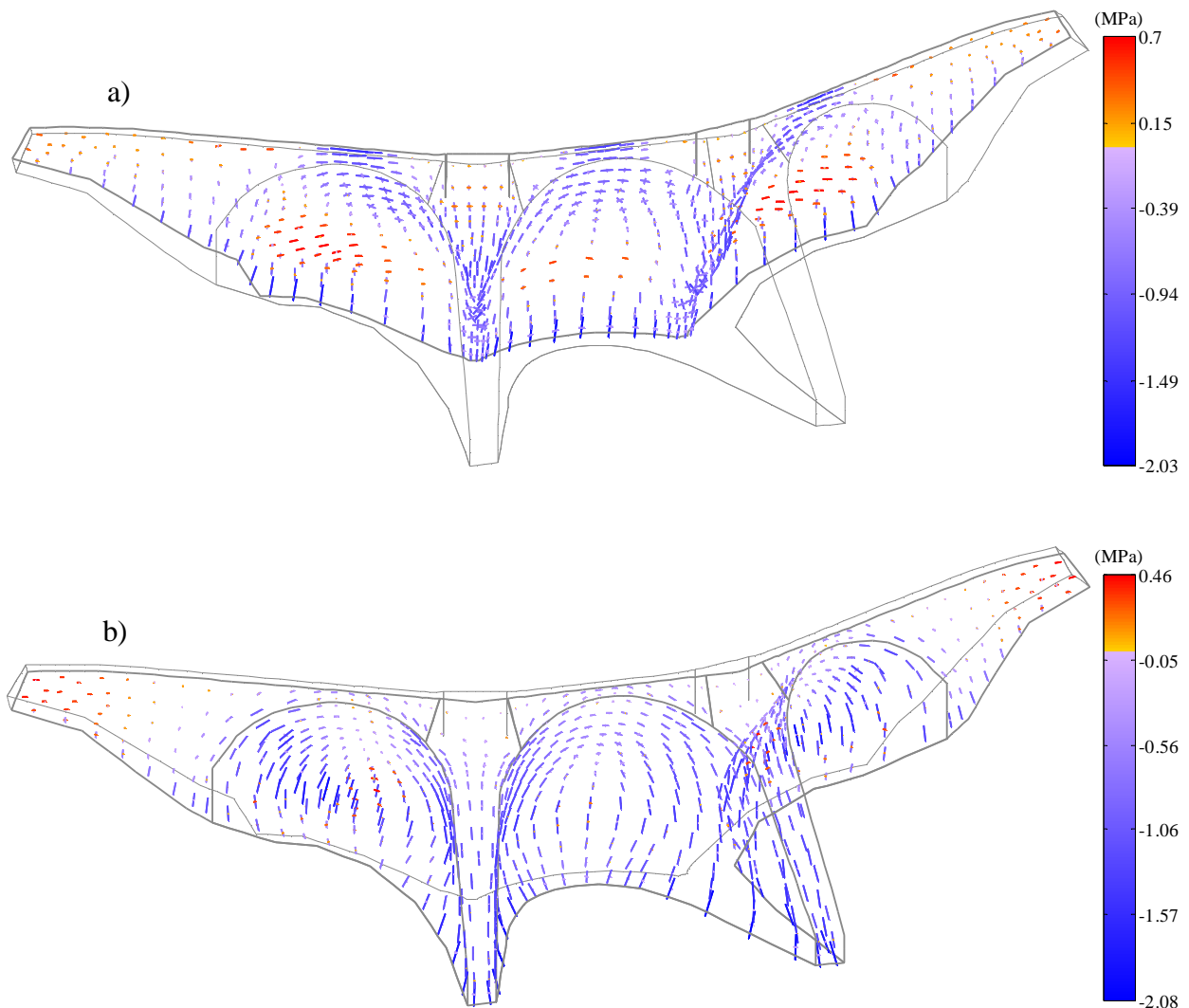


Figura 3.17 - Tensões principais associadas ao PP. a) Paramento de montante; b) Paramento de jusante.

3.2.2 Ação da Pressão Hidrostática

3.2.2.1 Deslocamentos

A Figura 3.18 ilustra o comportamento da barragem quando sujeita à ação da pressão hidrostática, no que diz respeito aos deslocamentos.

Pode-se ver, na Figura 3.18 a), que os deslocamentos horizontais têm um valor máximo de 21,23 mm para jusante, uma vez que a pressão hidrostática atua nesse sentido. A zona da barragem com maior deslocamento é no topo da abóbada central.

Os deslocamentos verticais mostrados na Figura 3.18 b) têm um valor máximo de 2,64 mm (para cima) e de -4,89 mm (para baixo). A zona da barragem com maior deslocamento vertical de assentamento (negativo) é no topo da abóbada central e nos contrafortes. Os deslocamentos verticais máximos positivos (de empolamento) ocorrem na zona inferior da barragem a montante, como se poderá ver também na Figura 3.19 c), mostrada a seguir.

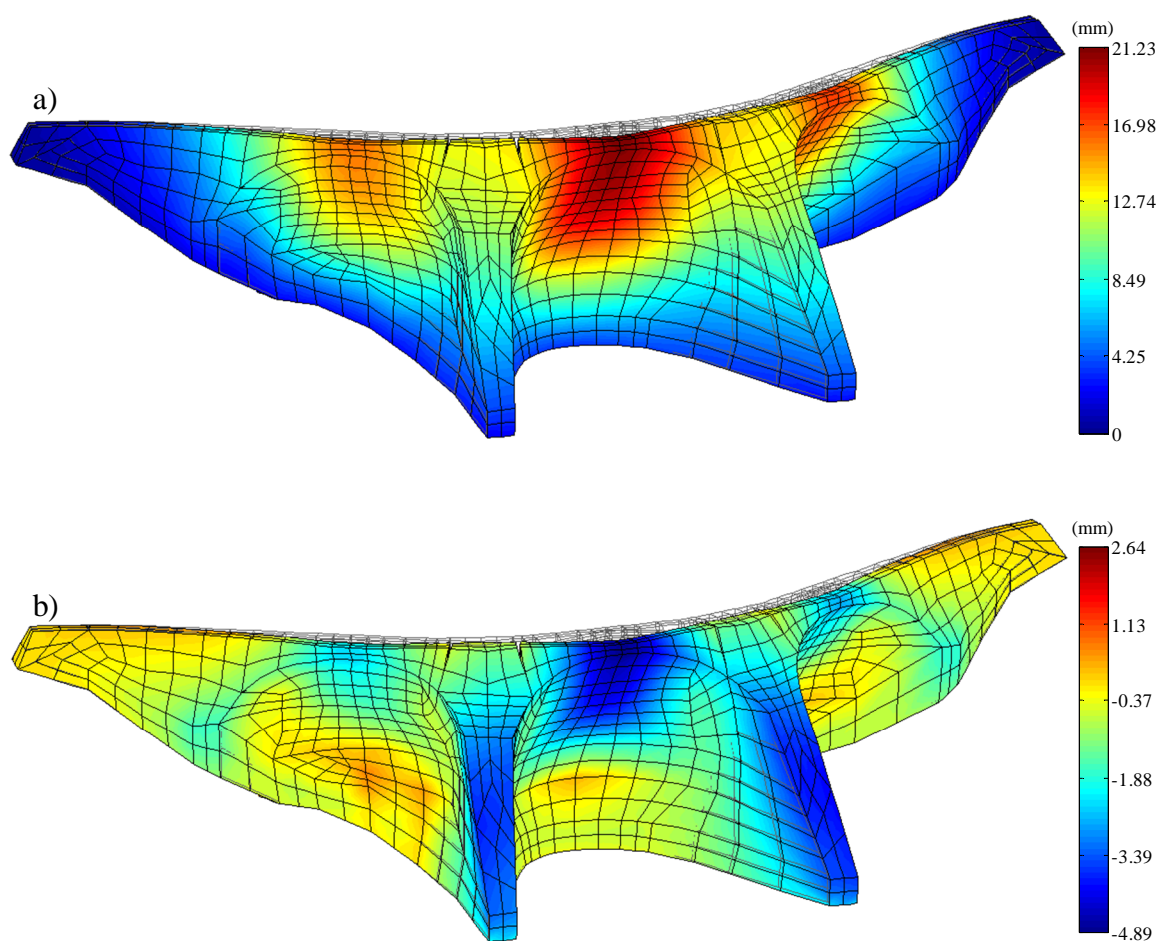


Figura 3.18 - Deslocamentos associados à PH. a) Horizontais; b) Verticais.

Relativamente aos deslocamentos no paramento de montante tem-se, na Figura 3.19 a) (deslocamentos globais), um valor máximo de 21,66 mm (sentido jusante) no topo da abóbada central.

Na Figura 3.19 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo para jusante de 21,19 mm, com os máximos a ocorrerem também no topo da abóbada do meio.

Na Figura 3.19 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de -4,54 mm negativos, no topo da abóbada central e, um valor máximo de 2,64 mm positivos na zona inferior da barragem, tal como referido na Figura 3.18.

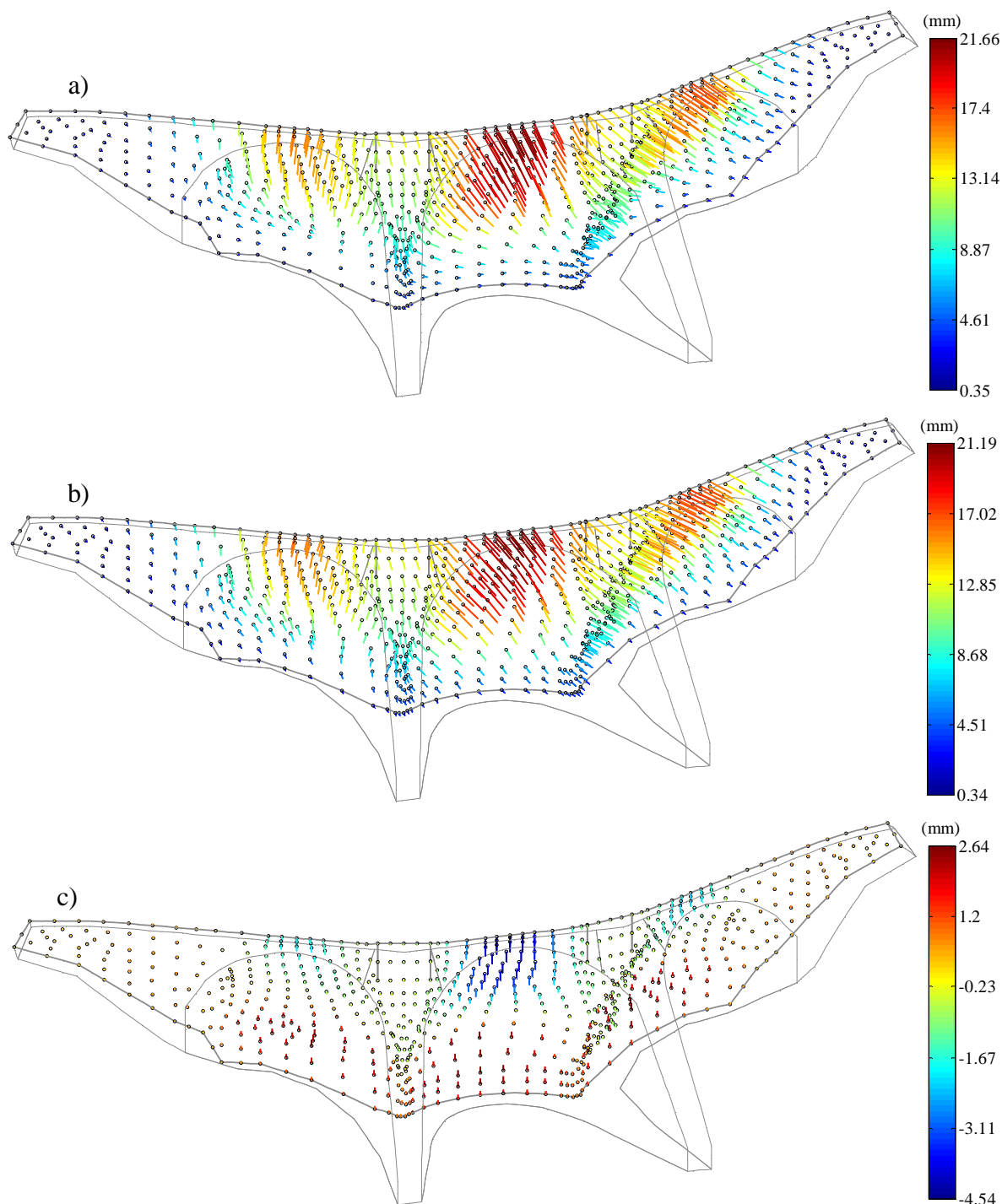


Figura 3.19 - Deslocamentos no paramento de montante associados à PH. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

Quanto aos deslocamentos no paramento de jusante tem-se, na Figura 3.20 a) (deslocamentos globais), um valor máximo de 21,77 mm (sentido jusante) no topo da abóbada central.

Na Figura 3.20 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo para jusante de 21,23 mm, com os máximos a ocorrerem no topo da abóbada central.

Na Figura 3.20 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de - 4,89 mm negativos, no topo da abóbada central e, um valor máximo de 0,77 mm positivos na zona inferior da barragem e nos encontros.

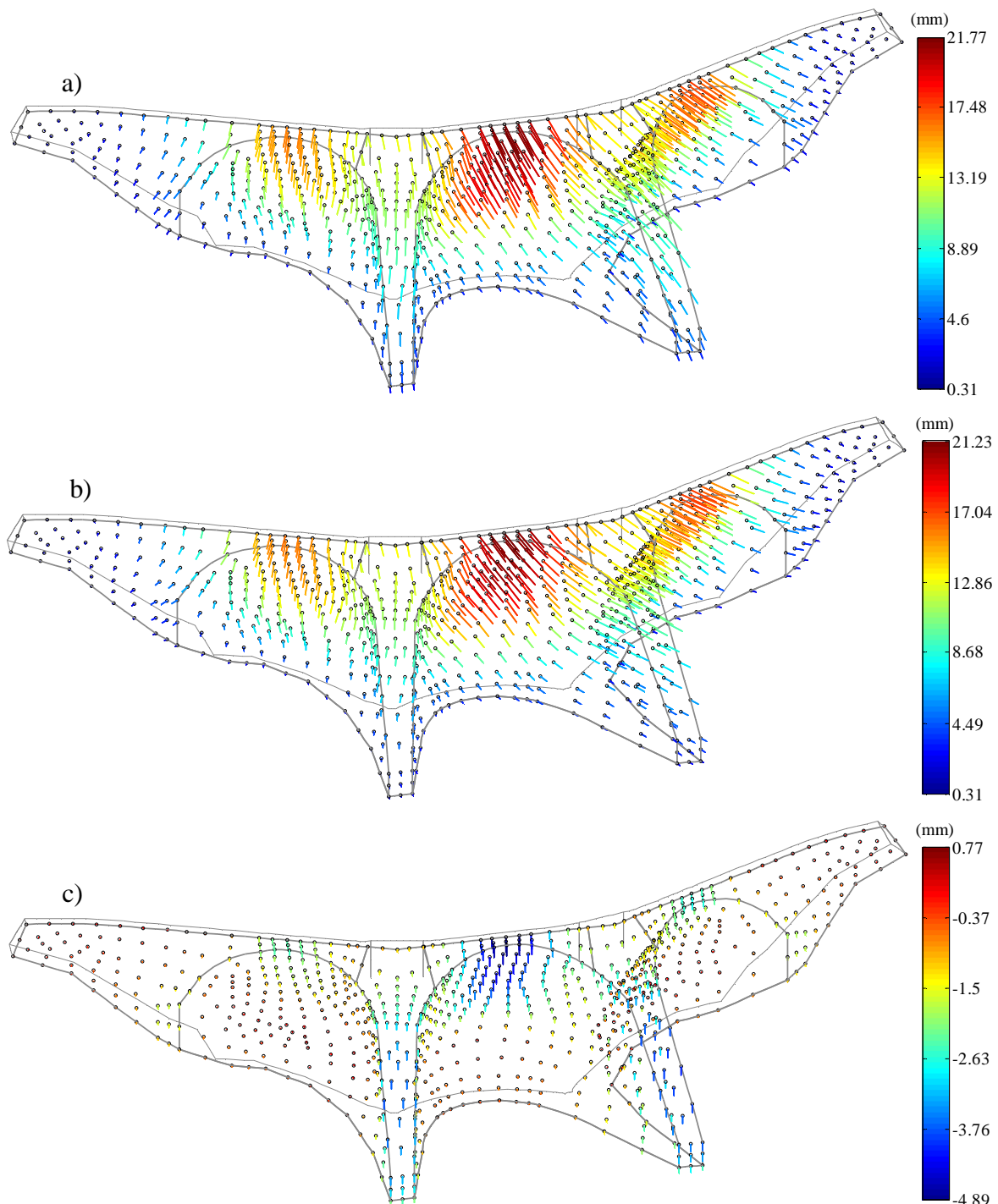


Figura 3.20 - Deslocamentos no paramento de jusante associados à PH. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

3.2.2.2 Tensões

Na Figura 3.21 a), paramento de montante, as tensões de compressão encontram-se no centro de cada abóbada (sentido do arco) e têm valor máximo de -4,32 MPa. As tensões máximas de tração têm um valor de 4,80 MPa e situam-se na zona inferior da barragem, com sentido variável conforme a zona.

Na Figura 3.21 b), paramento de jusante, as compressões estão presentes nas abóbadas e nos contrafortes, com sentido do arco e da inserção, respetivamente. As compressões têm um valor máximo de -5,33 MPa. No topo das abóbadas existem trações que têm um valor máximo de 2,99 MPa, com a orientação dos arcos.

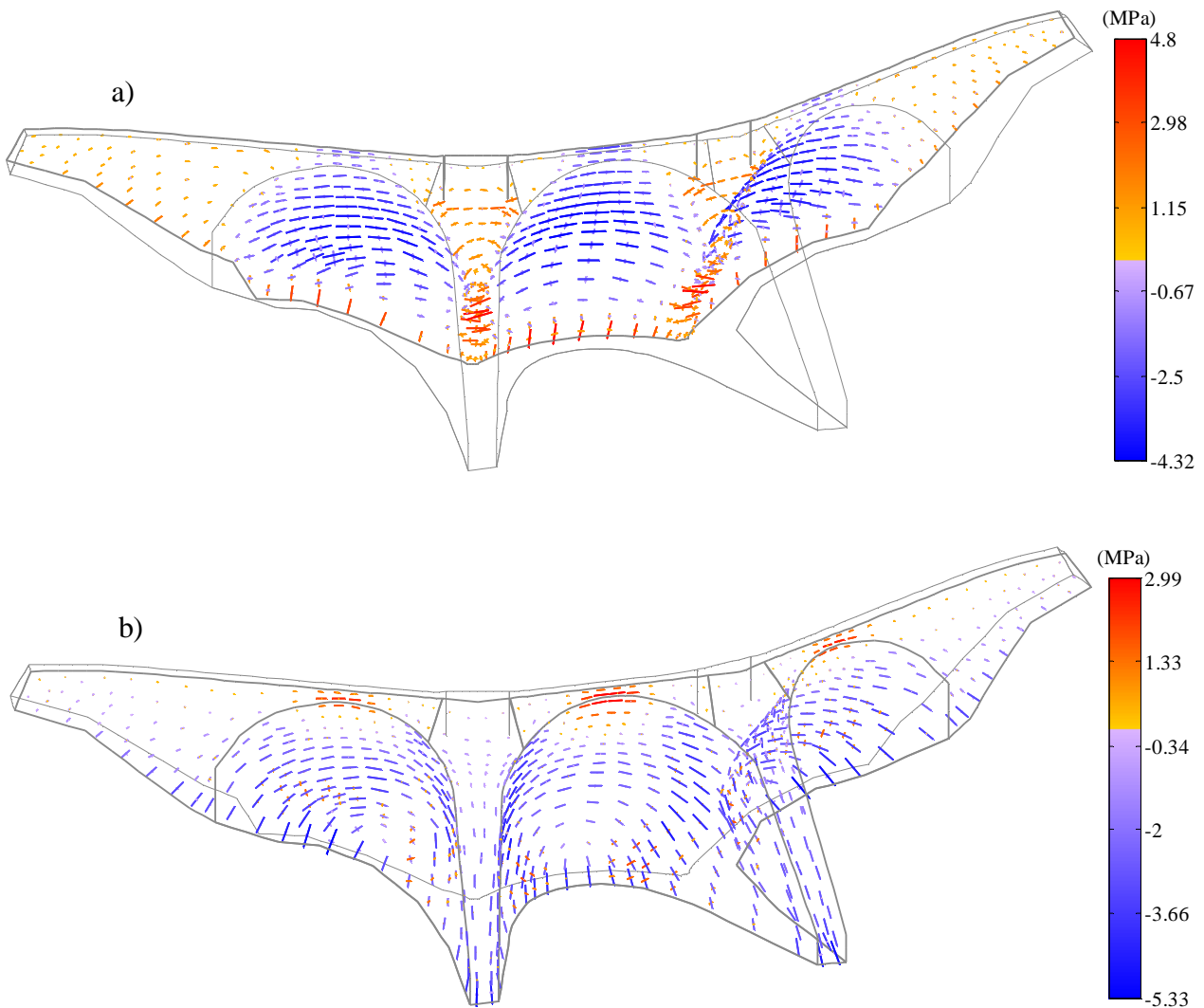


Figura 3.21 - Tensões principais associadas à PH. a) Paramento de montante; b) Paramento de jusante.

3.2.3 Ação das Expansões

3.2.3.1 Deslocamentos associados às ações expansivas

Na Figura 3.22 estão os gráficos correspondentes ao deslocamento da barragem quando sujeita à ação das expansões.

Relativamente aos deslocamentos horizontais pode-se ver que, na Figura 3.22 a), os valores máximos encontram-se no centro de cada abóbada. O valor máximo atingido é de 8,19 mm para montante. A localização da zona com maiores deslocamentos deve-se ao facto de ser uma zona com bastante humidade e com temperaturas elevadas, o que favorece as reações expansivas.

Na Figura 3.22 b) estão representados os deslocamentos verticais onde o valor máximo é de 11,75 mm (sentido positivo). A zonas com maiores expansões situam-se no topo das abóbadas.

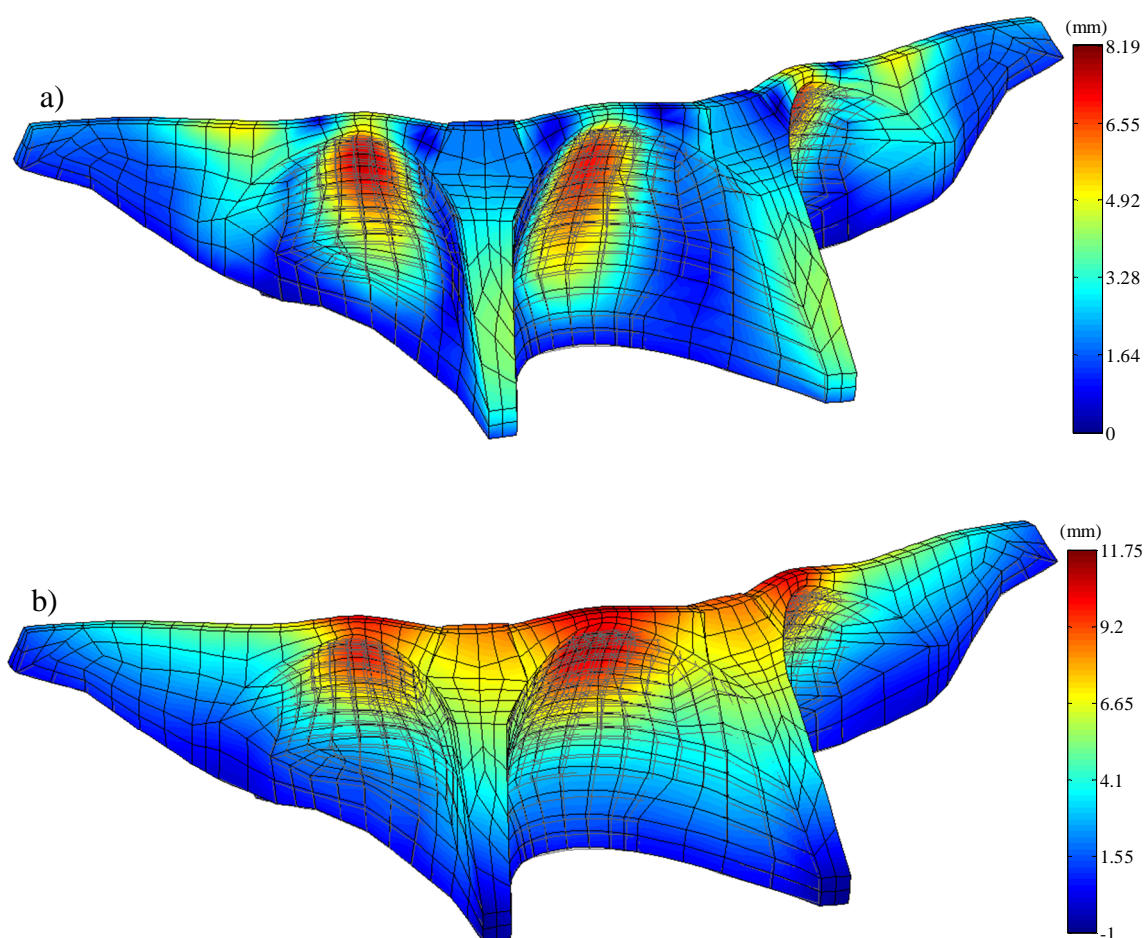


Figura 3.22 - Deslocamentos associados às ações expansivas. a) Horizontais; b) Verticais.

Em relação ao paramento de montante, tem-se para os deslocamentos globais, Figura 3.23 a), um comportamento da barragem com deslocamentos para montante na zona superior da cada abóbada, atingindo um valor máximo de 13,24 mm.

Na Figura 3.23 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, tem-se um valor máximo de 8,08 mm para montante, com os máximos a ocorrerem nas mesmas zonas da Figura 3.22 a).

Na Figura 3.23 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 11,75 mm positivos, no topo das abóbadas, tal como na Figura 3.22 b).

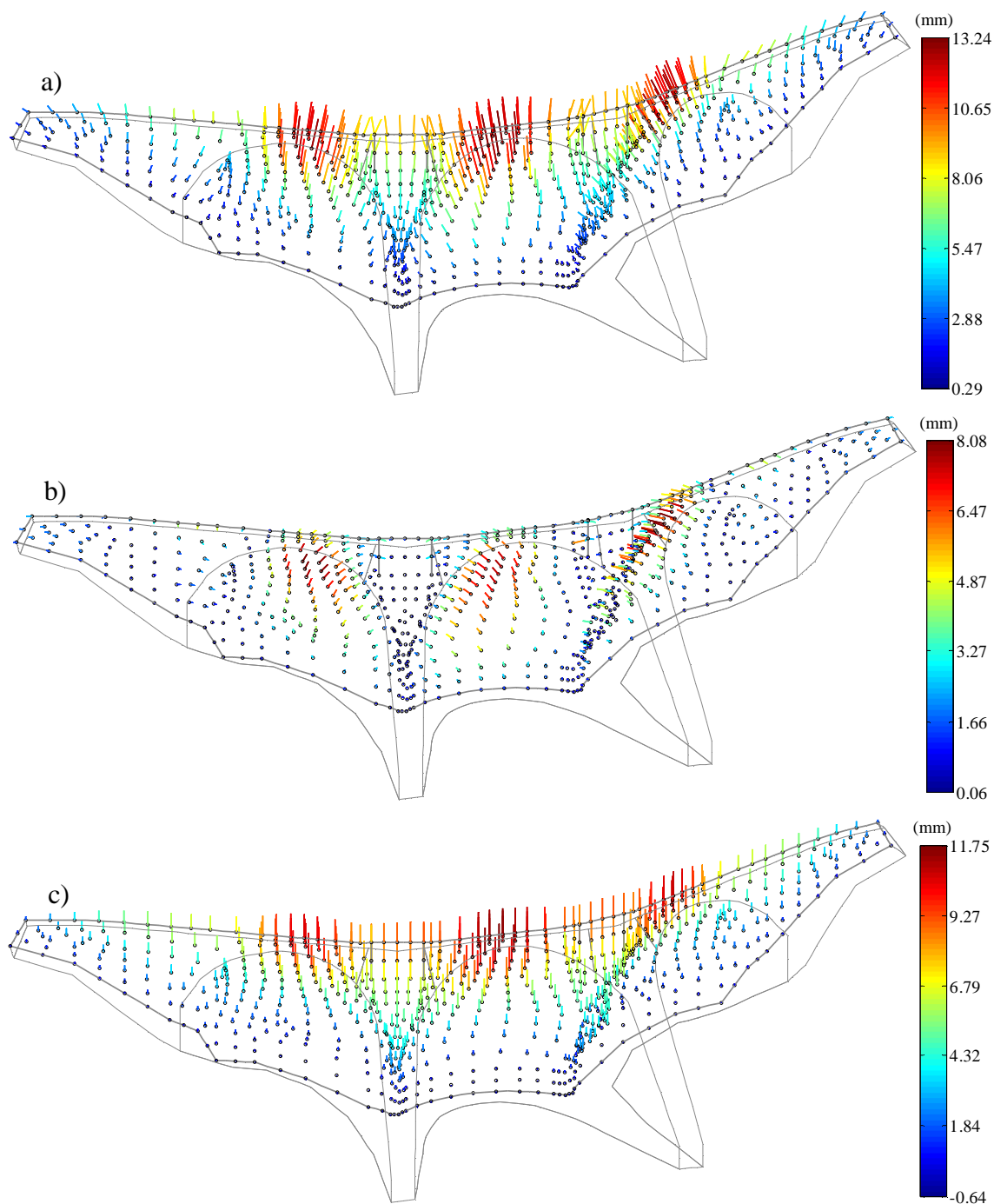


Figura 3.23 - Deslocamentos no paramento de montante associados às ações expansivas. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

Globalmente no paramento de jusante, na Figura 3.24 a), tem-se deslocamentos para montante, com máximos nos topos das abóbadas. O valor máximo atingido foi de 12,84 mm.

Na Figura 3.24 b) atingiu-se um máximo de 7,58 mm de deslocamento horizontal com sentido para jusante. As zonas de maiores deslocamentos são os topos das abóbadas.

Na Figura 3.24 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 10,89 mm para cima, também no topo das abóbadas.

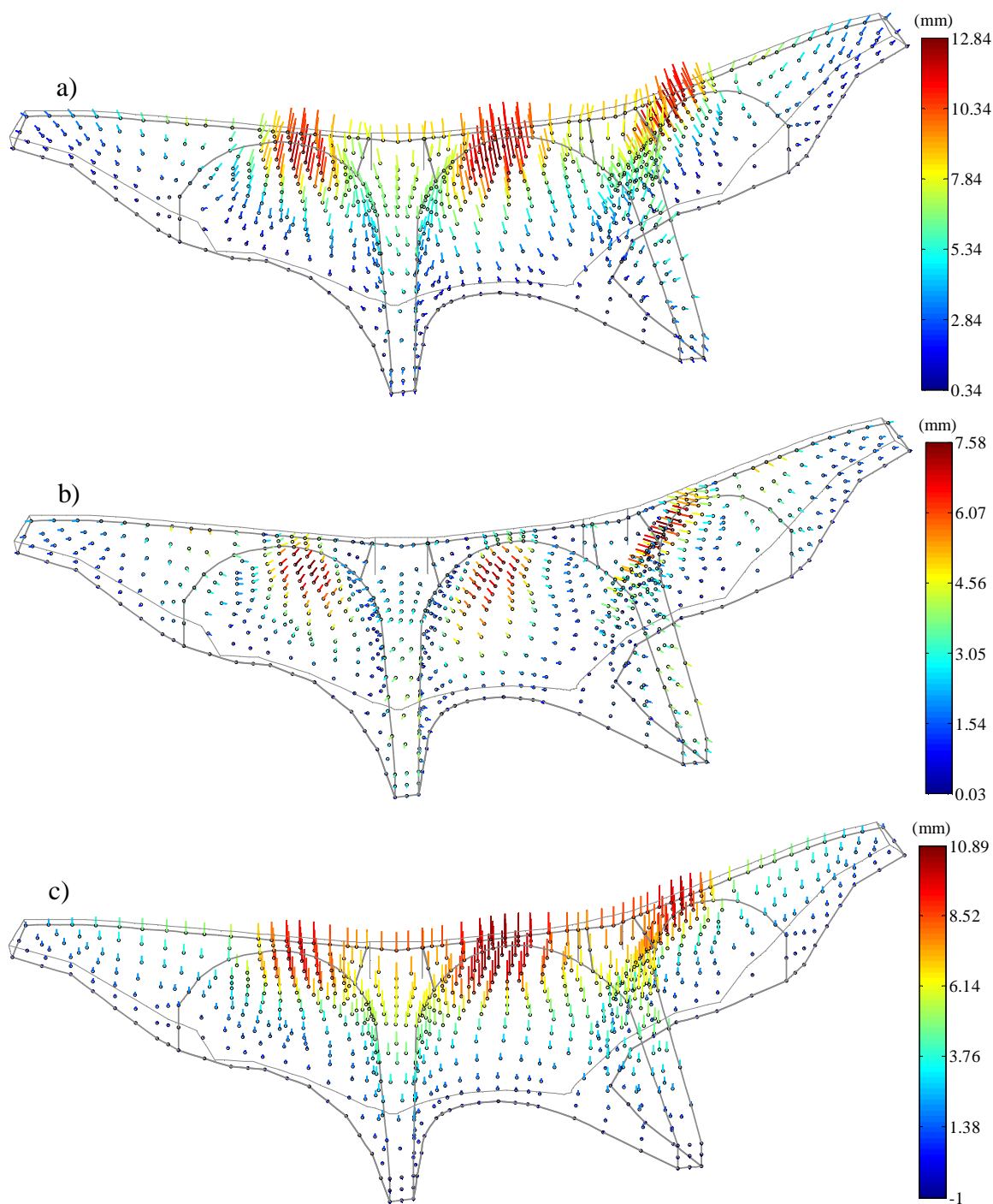


Figura 3.24 - Deslocamentos no paramento de jusante associados às ações expansivas. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

3.2.3.2 Tensões

No paramento de montante, na Figura 3.25 a), existem trações na zona do coroamento, com um máximo de 4,37 MPa. Relativamente às tensões de compressão, estas têm um máximo de 7,34 MPa, tendo a orientação do arco em quase todo o paramento.

Na Figura 3.25 b), paramento de jusante, tem-se um comportamento quase contrário ao da Figura 3.25 a). ou seja, na zona do coroamento a meio de cada abóbada, estão presentes compressões, com orientação do coroamento. Existem ainda compressões nos encontros e na base da abóbada central. As tensões de compressão têm um valor máximo de 6,81 MPa. Quanto às trações, estas estão presentes em quase todo o paramento, com as tensões de maior valor a incidirem nas zonas laterais de cada abóbada, atingindo um valor máximo de 4,19 MPa.

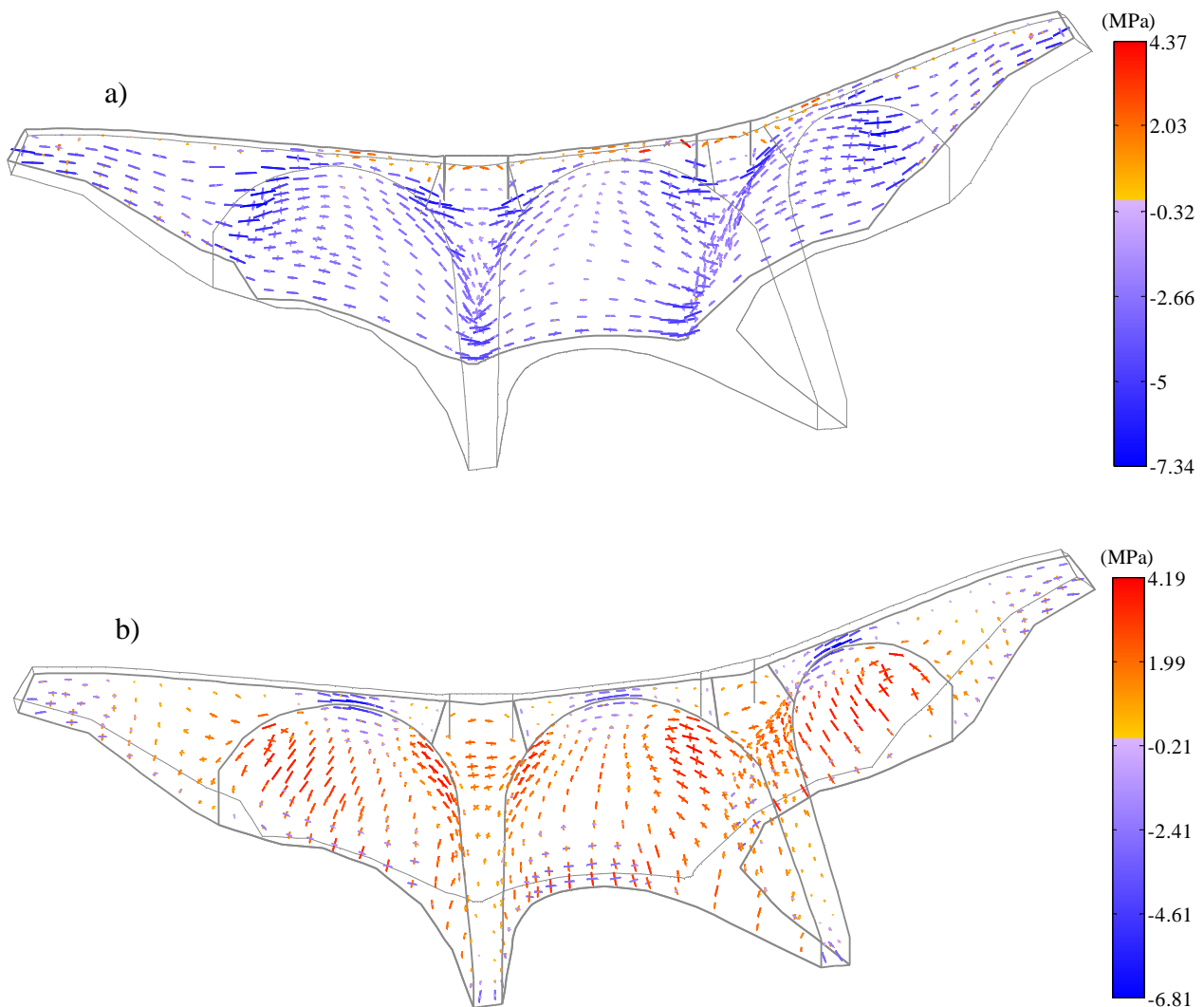


Figura 3.25 - Tensões principais associadas às ações expansivas. a) Paramento de montante; b) Paramento de jusante.

3.2.4 Ação da combinação PP+PH+Expansões

3.2.4.1 Deslocamentos associados a PP+PH+Expansões

Na Figura 3.26 são mostrados os deslocamentos relativos à ação da combinação PP+PH+Expansões.

Na Figura 3.26 a) estão representados os deslocamentos horizontais originados pela ação da combinação, que provoca um deslocamento para jusante da barragem. Os deslocamentos maiores dão-se na zona do coroamento, no meio da abóbada, tendo um valor máximo de 20,18 mm.

Na Figura 3.26 b), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 4,98 mm no sentido positivo (para cima) na zona do coroamento e no topo das abóbadas laterais. Existem também deslocamentos no sentido negativo na zona mais a jusante dos contrafortes, com os valores máximos a atingirem -5,90 mm.

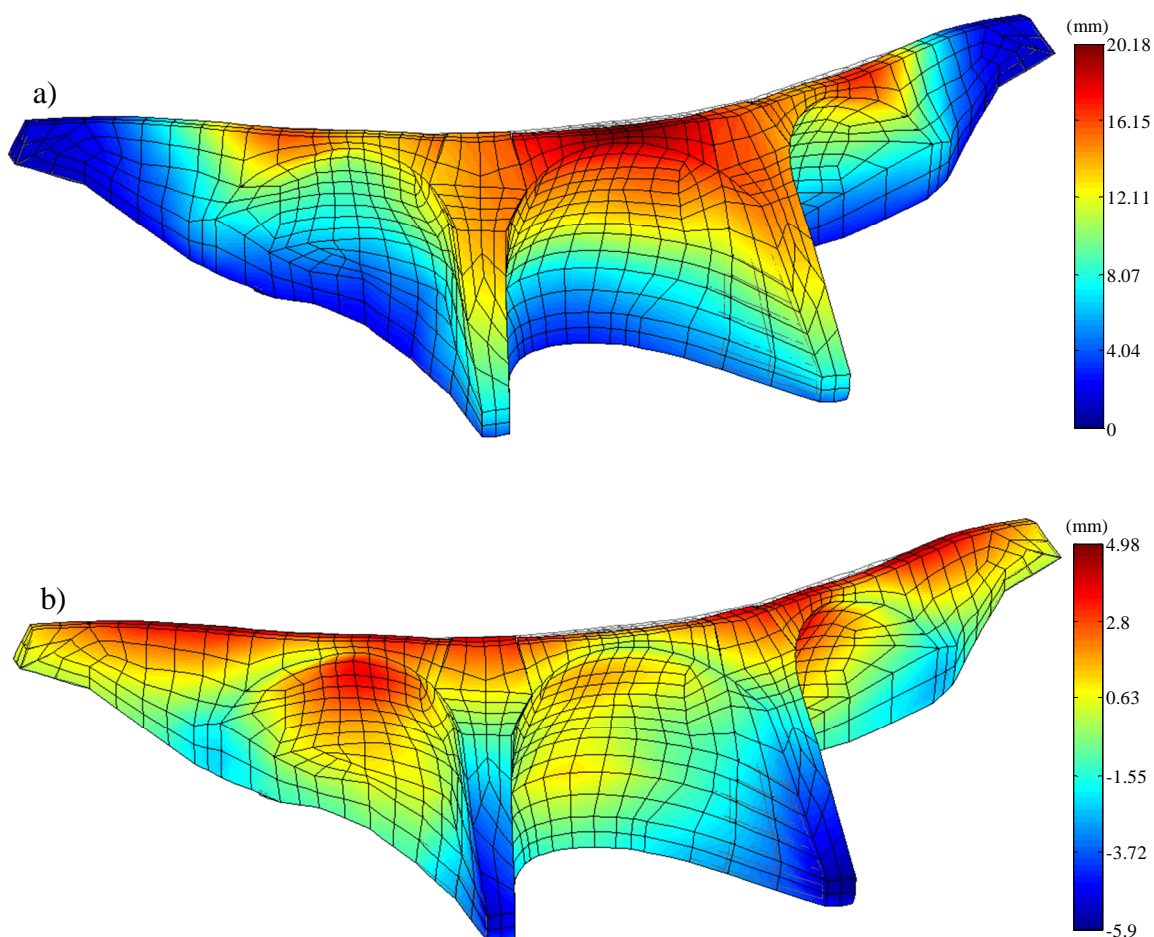


Figura 3.26 - Deslocamentos associados à combinação PP+PH+Expansões. a) Horizontais; b) Verticais.

Nos deslocamentos globais, no paramento de montante, obteve-se um máximo de 19,91 mm para jusante, com a zona de maior deslocamento no topo da abóbada central (Figura 3.27 a)).

Na Figura 3.27 b), correspondente aos deslocamentos horizontais, obteve-se um valor máximo de 19,81 mm para jusante, com os máximos a ocorrerem também no topo da abóbada do meio.

Na Figura 3.27 c), correspondente aos deslocamentos verticais, tem-se um valor máximo de 4,96 mm para cima, na zona superior da barragem e, um valor máximo de -1,46 mm negativos na zona inferior da barragem, junto à fundação.

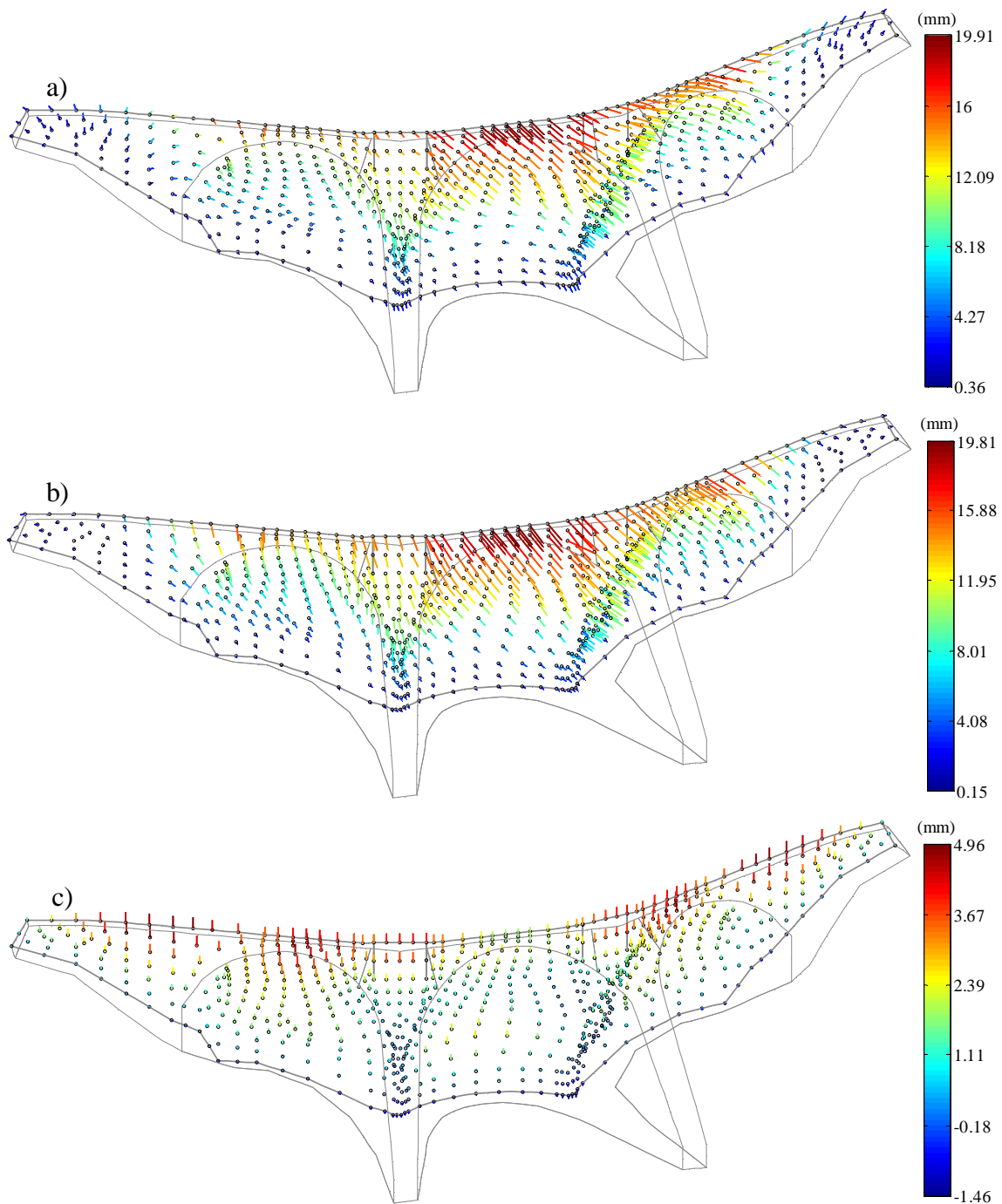


Figura 3.27 - Deslocamentos no paramento de montante associados à combinação PP+PH+Expansões. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

No paramento de jusante, Figura 3.28 a), os deslocamentos globais têm a direção de jusante, onde a zona de maior deslocamento se situa no topo da abóbada central e tem um máximo de 20,19 mm.

A Figura 3.28 b), que diz respeito aos deslocamentos horizontais, tem um comportamento muito idêntico à figura a). A zona de maiores deslocamentos é a mesma e o valor máximo atingido é de 20,18 mm.

Na Figura 3.28 c), na zona superior da barragem, tem-se deslocamentos verticais positivos (para cima) com um máximo de 3,67 mm. Na zona dos contrafortes tem-se deslocamentos verticais negativos com máximo de -5,90 mm.

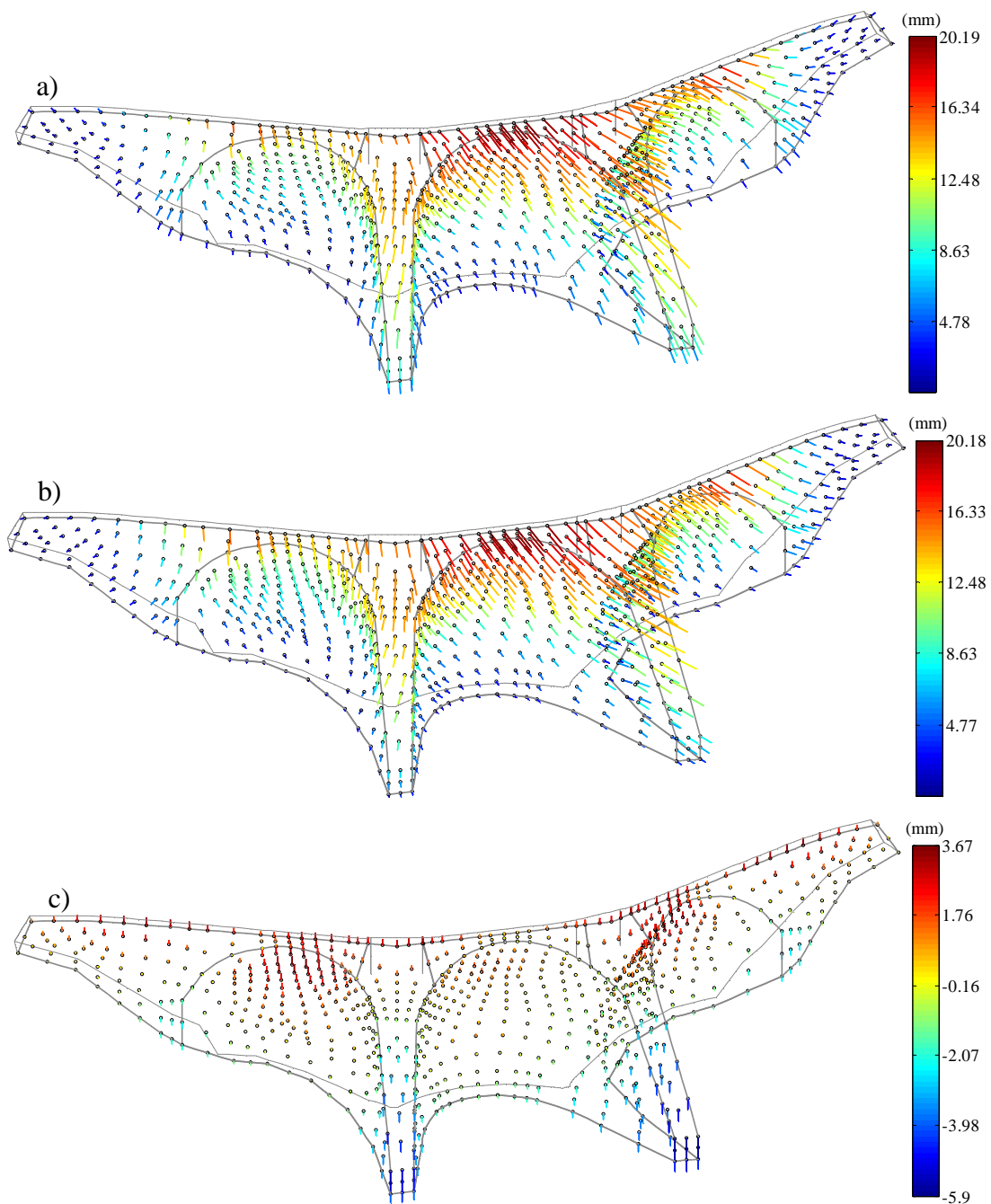


Figura 3.28 - Deslocamentos no paramento de jusante associados à combinação PP+PH+Expansões. a) Globais; b) Horizontais; c) Verticais.

3.2.4.2 Tensões

Relativamente às tensões, pode-se ver na Figura 3.29 a), paramento de montante, trações na zona do coroamento que atingem um valor máximo de 4,87 MPa. As compressões estão presentes em quase todo o paramento de montante com a orientação dos arcos, atingindo um valor máximo de 8,64 MPa.

Na Figura 3.29 b), paramento de jusante, as compressões estão presentes no topo das abóbadas laterais, na zona dos contrafortes e na base da barragem principalmente, atingindo um máximo de 9,65 MPa. As trações estão presentes maioritariamente nas abóbadas, com um máximo de 2,94 MPa.

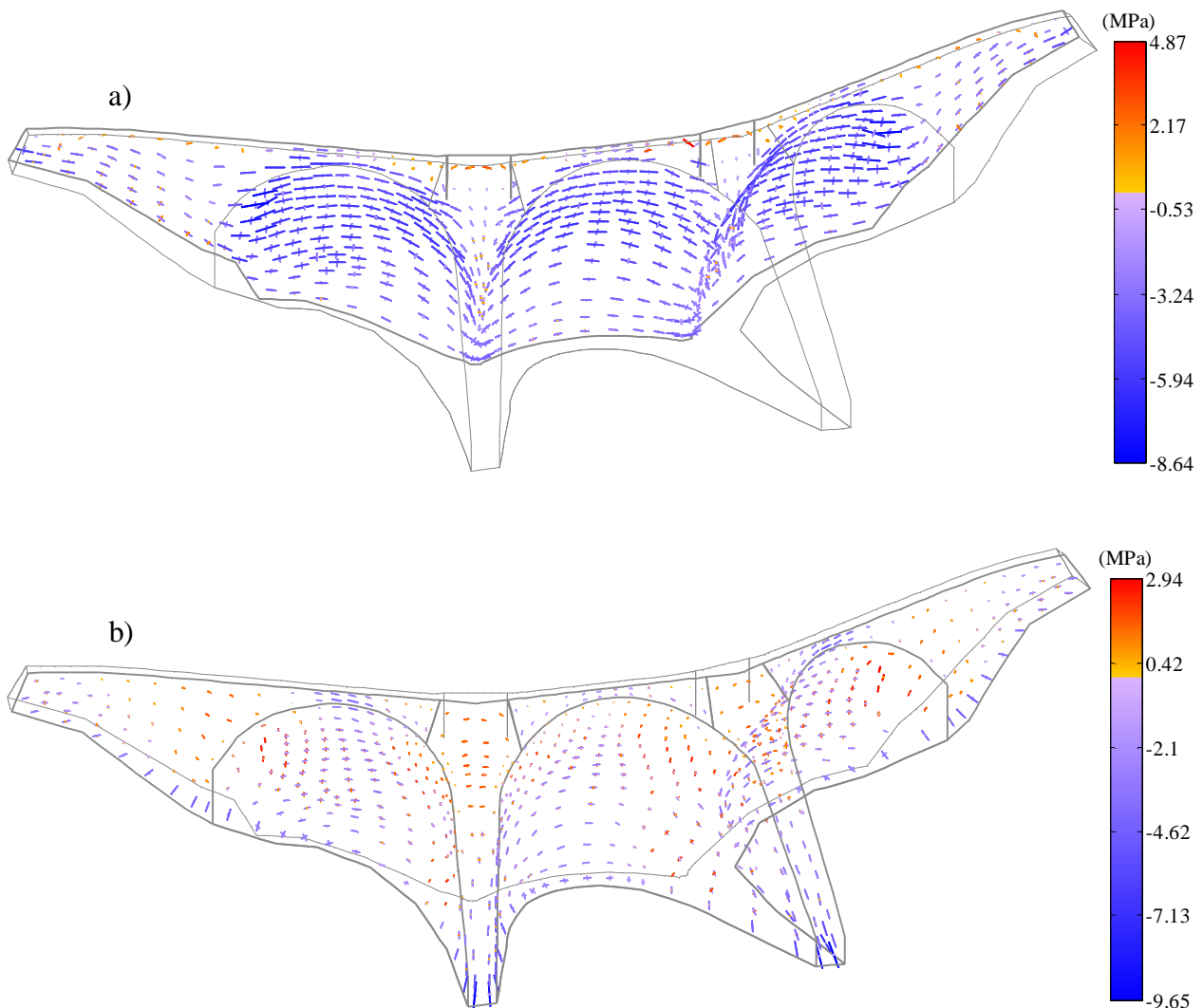


Figura 3.29 - Tensões principais associadas à combinação PP+PH+Expansões. a) Paramento de montante;
b) Paramento de jusante.

3.3 Considerações finais

Neste capítulo foram mostradas as características da barragem da Agueira, nomeadamente a localização, geometria, materiais utilizados e tipos de equipamentos presentes. Foram também apresentadas as ações presentes na barragem, a cota de água, a temperatura do ar e as expansões.

Foi possível, através dos valores das expansões obtidas pelos extensómetros corretores e também a confirmação através dos extensómetros de varas da existência de expansões na barragem da Agueira, fazer-se a comparação com as expansões calculadas com recurso aos dados da temperatura e da humidade do betão e, concluir que existem expansões e que estas estão bem calibradas no programa **Expand2014**. Assim, tendo segurança nos resultados das expansões, foram calculados os deslocamentos devidos à ação das expansões com confiança.

Neste capítulo, no ponto 3.1.5 foram mostradas as características utilizadas do betão da barragem da Agueira. Este foi um ponto fulcral no desenvolvimento deste trabalho, devido à alteração das características adotadas relativamente a trabalhos anteriores. No estudo desta barragem, ao longo desta dissertação, concluiu-se que o betão presente na barragem tem vindo a sofrer alterações devido às expansões, e assim, a fluência do betão que inicialmente tinha vindo a ser utilizada foi alterada para valores que se traduzem no dobro da fluência que se ponderava à partida. Com essa alteração, não só as conclusões são diferentes de trabalhos anteriores como estão coerentes com os dados relativos aos valores medidos pelos aparelhos.

Com a apresentação da barragem da Agueira, é possível ter-se uma melhor compreensão do seu comportamento quando mostrados os resultados do MEF. Foram também mostrados neste capítulo os resultados previstos pelo MEF relativamente à ação do peso próprio, da pressão hidrostática, das expansões e da combinação PP+PH+Expansões (peso próprio, pressão hidrostática e expansões). Para cada uma das ações foram mostrados os campos de deslocamento horizontais e verticais, os deslocamentos globais, horizontais e verticais de cada paramento (montante e jusante) e também as tensões nos paramentos de montante e de jusante. Realça-se o facto de os valores obtidos serem de acordo ao expectável, com a ação das expansões a ter deslocamentos para cima e para montante, contrariando as restantes ações.

4

Utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos. Apresentação do programa **DamSafe3.0**, desenvolvido em **MATLAB**

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se o programa **DamSafe3.0** referindo que é constituído por dois módulos: um módulo de elementos finitos (módulo MEF) e um módulo de separação de efeitos (módulo MSE). O programa **DamSafe3.0** desenvolvido no âmbito do presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa do comportamento de barragens de betão, recorrendo simultaneamente aos dois métodos já mencionados anteriormente, o método dos elementos finitos (MEF) e o método de separação de efeitos (MSE). Neste capítulo mostra-se a estrutura do programa **DamSafe3.0** e como o mesmo foi desenvolvido, desde os dados iniciais introduzidos e os ficheiros que lê, até aos gráficos de comparação dos dois métodos.

É possível com o programa **DamSafe3.0** analisar o comportamento da barragem ao longo do tempo pelo método da separação de efeitos, observar simultaneamente várias grandezas para cada ponto de observação, tendo assim uma melhor compreensão do seu comportamento, comparar os resultados obtidos aos resultados previstos pelo método dos elementos finitos e, fazer todo esse estudo e análise através não só de valores como também através de gráficos. Com a implementação de uma rotina de cálculo torna-se possível obter resultados de forma rápida e automática do que se pretende

analisar e com o acrescento de se ter a possibilidade de se visualizar graficamente esses mesmos resultados. Neste trabalho utilizou-se o *software* MATLAB para o desenvolvimento do algoritmo criado neste trabalho. Este *software* oferece uma linguagem de programação fácil e intuitiva, mas também, e principalmente para este trabalho, possibilita a criação de gráficos de forma simples e prática para o utilizador. Na Figura 4.1 mostra-se o ambiente de trabalho do *software* MATLAB, onde existem várias divisões. À esquerda tem-se a diretoria do trabalho e todos os ficheiros nela incluídos, à direita estão todas as variáveis criadas no programa e as suas características, em baixo pode-se executar comandos e funções e ao centro tem-se o editor de código (Morais & Vieira, 2013).

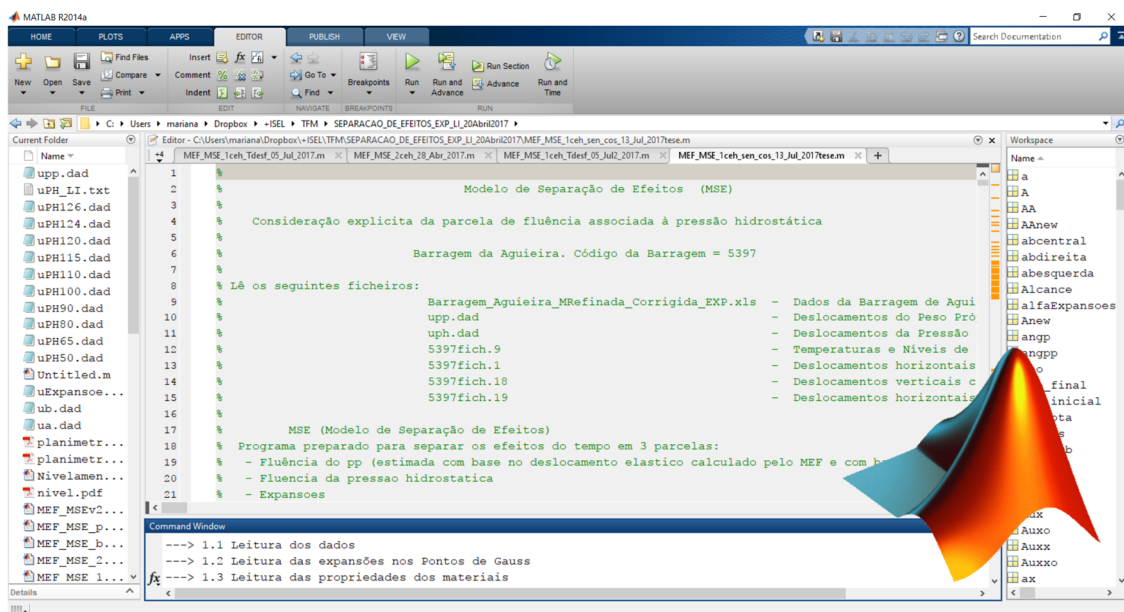


Figura 4.1 - Ambiente de trabalho do *software* utilizado, MATLAB.

4.2 Organização do programa

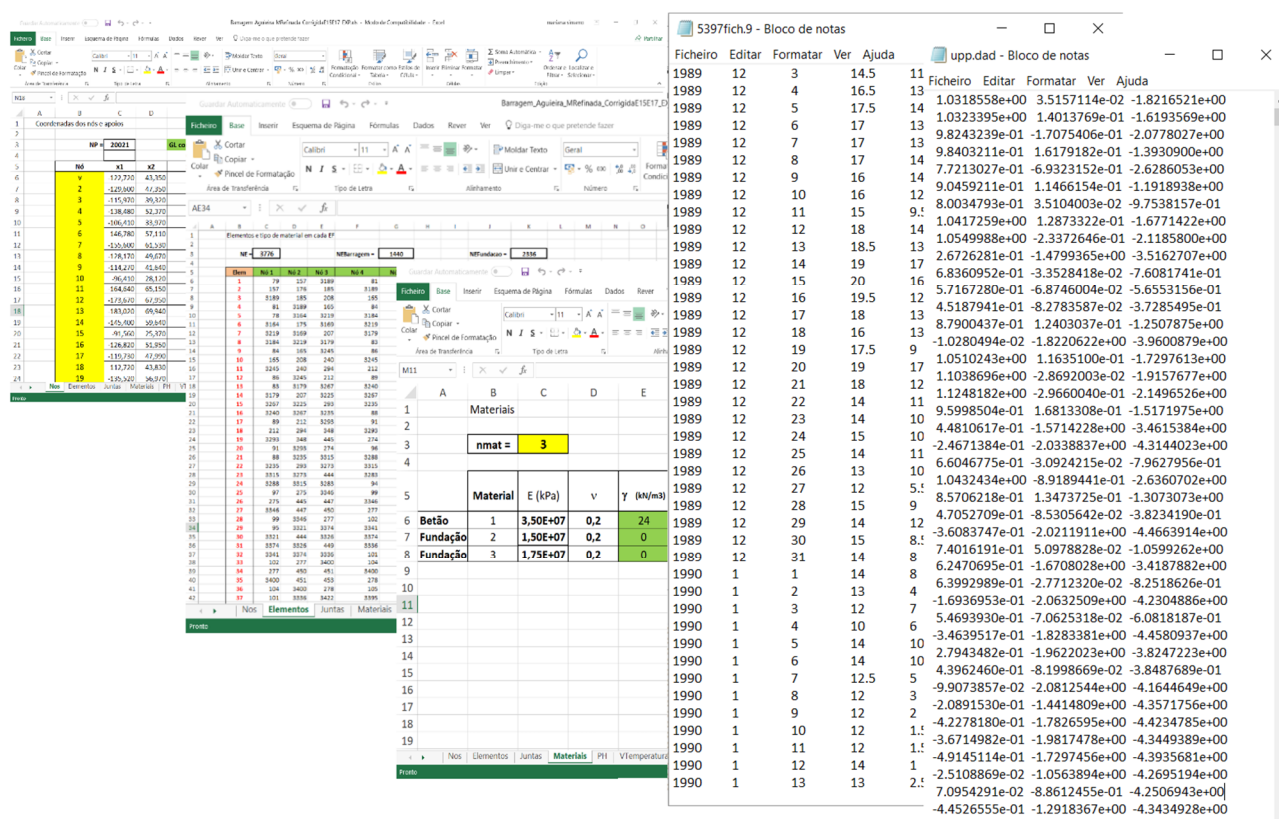
O programa **DamSafe3.0** está dividido em dois módulos: MEF e MSE. O módulo MEF faz a leitura dos dados referentes à malha de elementos finitos, propriedades dos materiais e ações, e efetua os cálculos numéricos para diversas combinações de ações. No módulo MSE faz-se uma leitura dos dados relativos à separação de efeitos e, posteriormente, apresentam-se os gráficos relativos às funções de fluência, ao comportamento da barragem para cada aparelho ao longo do tempo e finalmente as figuras onde são feitas as comparações entre os dois métodos. Na Figura 4.2 mostra-se o algoritmo do programa elaborado.

	1.1	Leitura dos dados	
	1.2	Leitura das expansões nos Pontos de Gauss	
	1.3	Leitura das propriedades dos materiais	
	1.4	Desenho da malha da barragem + fundação considerando só as faces exteriores. Materiais	
	1.5	Malha da barragem. Desenho só com faces exteriores das barragem	
	1.6	Definição do contorno da barragem	
	1.7	Desenhos da barragem	
M	1.8	Desenho dos contornos: Paramentos e abóbodas	
1. E	1.9	Malha 3D. Contornos das três abóbodas	
F			
	1.10	Leituras dos deslocamentos calculados pelo MEF	
	1.10.1		Linhas de Influência MEF : efeito elástico da PH.
	1.10.1.1		Linhas de influência do deslocamento radial, em vários pontos nodais
	1.10.1.2		Linhas de Influencia MEF : efeito elástico da VT anual. Linhas de influência do deslocamento radial, em vários pontos nodais
	1.10.2		Desenho da malha deformada MEF: Deslocamentos do PP
	1.10.3		Desenho da malha deformada MEF: Deslocamentos PH
	2.1	Barragem da Agueira. Altura e Cota da Base	
	2.2	Definição do tipo de aparelho e da grandeza a analisar (Radial, Tangencial, Vertical)	
	2.3	Leitura dos ficheiros de dados: temperaturas do ar e níveis e deslocamentos	
	2.4	Escolha de pontos a ler	
	2.5.1		Coordenadas x, y e z e ângulo dos aparelhos
	2.5.2		Leitura das cotas de água e temperatura do ar
	2.5.3		Discretização do nível da albufeira em patamares mensais
	2.5.4		Parâmetros da função de fluência (Fórmula de Bazant e Panula)
	2.5.5		Fluência devida ao PP
M	2.5.6.1		Correção, tirando a fluência do PP
2. S	2.5.6.2		Correção, tirando o movimento de deslizamento observado ao nível da fundação
E	2.5.7		Efeito elástico do nível. Coeficiente da exponencial adotada (entre 10 e 25)
	2.5.8		Fluência PH
	2.5.9		Montagem da matriz do coeficientes para obter a solução pelo MMQ
	2.5.10		Início dos gráficos de cada aparelho
	2.6	Comparação entre os resultados globais do MSE e MEF	
	2.6.1		Efeito elástico do nível
	2.6.2		Efeito da temperatura
	2.6.3		Efeito do tempo (sem fluência)

Figura 4.2 - Esquema do algoritmo do programa **DamSafe3.0**.

4.2.1 Programa DamSafe3.0. Módulo MEF

A primeira parte do programa **DamSafe3.0** relativa ao MEF, está subdividida em dez secções. Nas secções 1.1 a 1.3 faz-se a leitura dos dados referentes à sua geometria e características dos materiais. São aí lidos alguns dados existentes em ficheiros, como por exemplo *.xls*. Nestas secções do programa o ficheiro utilizado tem a designação de *Barragem_Aguieira_MRefinada_Corrigida_EXP.xls*, que contém os dados da barragem de Aguieira para o MEF. A partir desse ficheiro são lidas quatro folhas nomeadamente a folha *Nos*, onde estão a numeração, as coordenadas e os apoios de cada ponto da barragem, a folha *Elementos*, onde estão definidos cada elemento e o respetivo tipo de material atribuído, a folha *Expansoes*, onde se fornece o valor da ação expansiva correspondente às expansões acumuladas num dado período e por fim a folha *Materiais*, que contém a informação acerca de cada tipo de material. Na Figura 4.3 apresentam-se exemplos de ficheiros lidos pelo programa desenvolvido.



Do ponto 1.4 até ao ponto 1.9, são elaboradas as figuras das várias representações da barragem e da definição dos contornos da mesma. Na Figura 4.4 mostram-se os vários exemplos de figuras relativas à malha e à geometria da barragem.

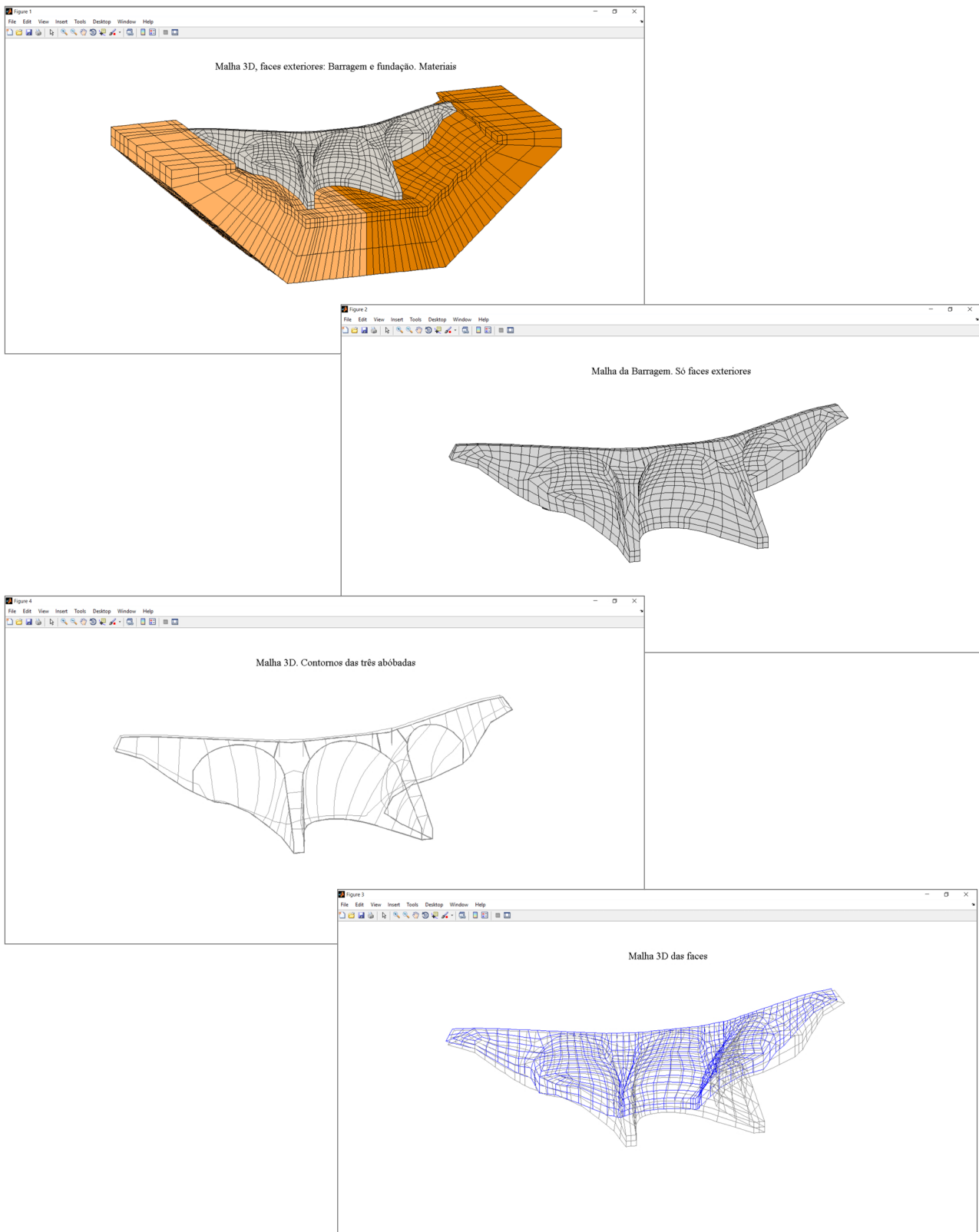


Figura 4.4 - Exemplos de saídas de figuras da primeira parte do programa **DamSafe3.0**.

Por último, no ponto 1.10, o programa **DamSafe3.0** vai buscar os resultados obtidos na primeira componente do programa. Essa primeira componente calcula os deslocamentos pelo MEF e cria ficheiros com os resultados para posterior leitura pela segunda componente do programa desenvolvido. Esses ficheiros, criados pela componente do MEF, são:

- upp.dad - Resultados dos deslocamentos do Peso Próprio calculados pelo MEF;
- uph126.dad - Resultados dos deslocamentos da Pressão Hidrostática calculados pelo MEF;
- uExpansoes.dad - Resultados dos deslocamentos das Expansões calculados pelo MEF;
- uPH_LI.txt - Resultados dos deslocamentos em todos os nós (barragem+fundação) para todas as cotas de água;
- ua.dad - Resultados dos deslocamentos térmicos (parcela do cosseno);
- ub.dad - Resultados dos deslocamentos térmicos (parcela do seno).

Ainda na secção 1.10 têm-se as figuras com os resultados dos deslocamentos obtidos pela primeira componente, para o peso próprio e para a pressão hidrostática. Na Figura 4.5 mostram-se as imagens dos deslocamentos obtidos pelo MEF.

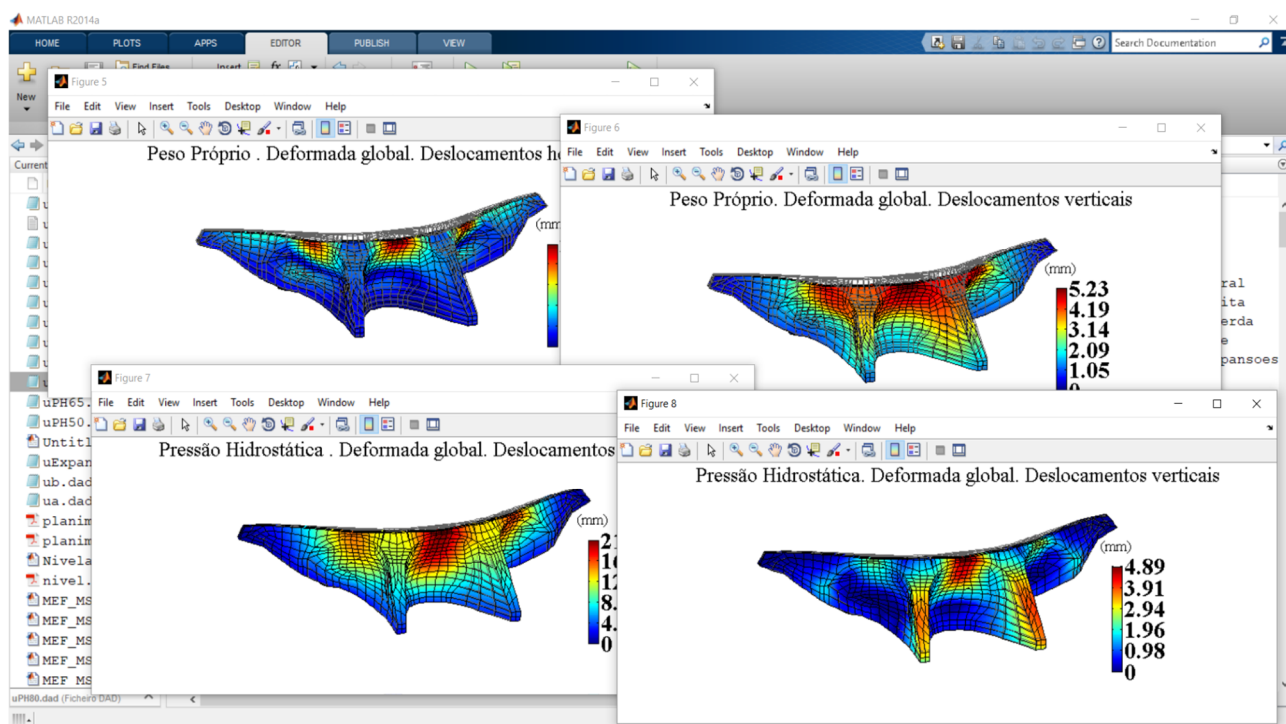


Figura 4.5 - Exemplo de figuras dos deslocamentos obtidos pela primeira componente do programa **DamSafe3.0**.

4.2.2 Programa DamSafe3.0. Módulo MSE

A segunda parte do programa **DamSafe3.0** é o módulo MSE. Esta parte do programa está dividida em seis secções. Na secção 2.1 apenas é definida a altura da barragem. Na secção 2.2 é o local onde se escolhe qual o aparelho que se pretende observar os resultados (fio de prumo, nivelamento ou geodesia), onde se define se se pretende ou não fixar o parâmetro do efeito elástico do nível, onde se define qual o tipo de fluência (Grau 1, 1,5, 2, 3, ou 4) e onde se escolhe a grandeza a analisar (radial, tangencial ou vertical). Na secção 2.3 são lidos dois ficheiros, o ficheiro *5397fich.9* que contém informação sobre a temperatura e a cota de água e, o outro ficheiro pode ser o ficheiro *5397fich.1*, *5397fich.18* ou *5397fich.19*, que contém os deslocamentos dos fios de prumo, nivelamentos e geodesia, respetivamente.

Na secção 2.4 pode-se escolher quais os aparelhos que se pretende ter resultados, não só para uma mais fácil comparação entre os mesmos não exibindo informação desnecessária, como também para que o programa não execute os desenhos para todos os aparelhos se se pretender apenas alguns, de modo a agilizar o processo.

Na secção 2.5 são efetuados os gráficos para cada aparelho. Em 2.5.1 define-se as coordenadas e os ângulos de cada aparelho, em 2.5.2 define-se a temperatura do ar e as cotas de água, em 2.5.3 faz-se a discretização do nível da albufeira em patamares mensais, em 2.5.4 são definidos os parâmetros para a função de fluência para cada um dos tipos de betão e geram-se os respetivos gráficos, tal como mostrado na Figura 4.6.

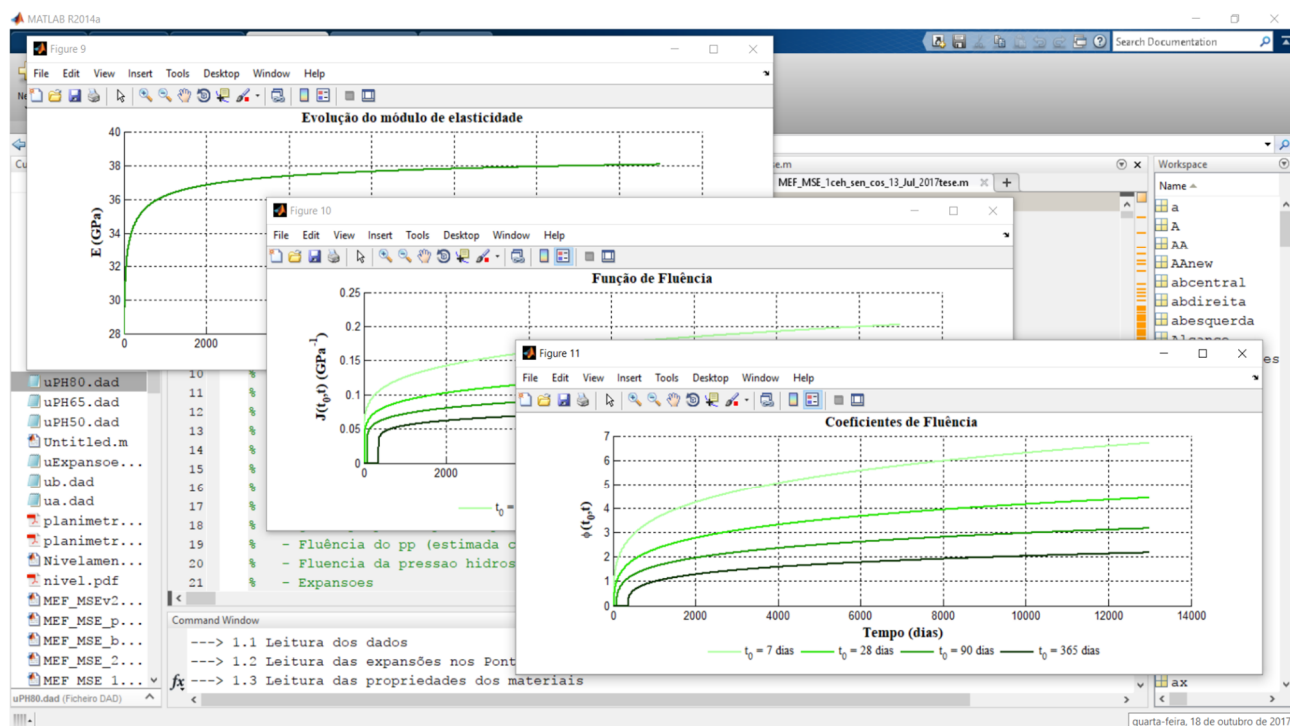


Figura 4.6 - Gráficos da função de fluência.

Em 2.5.5 define-se a fluência devido ao peso próprio. Em 2.5.6 fazem-se algumas correções caso se pretenda, ou seja, pode-se definir por exemplo que existe um deslizamento da fundação e então o deslocamento total da barragem em cada ponto é assim afetado por esse deslizamento.

Em 2.5.7 estão definidos os coeficientes do efeito elástico do nível para cada aparelho. Na secção 2.5.8 define-se a fluência relativa à pressão hidrostática. E em 2.5.9 faz-se então a montagem da matriz dos coeficientes para obter a solução pelo MMQ. Com tudo o que anteriormente foi descrito é possível então proceder-se à representação dos gráficos para cada aparelho na secção 2.5.10. Na Figura 4.7 estão representados exemplos desses gráficos.

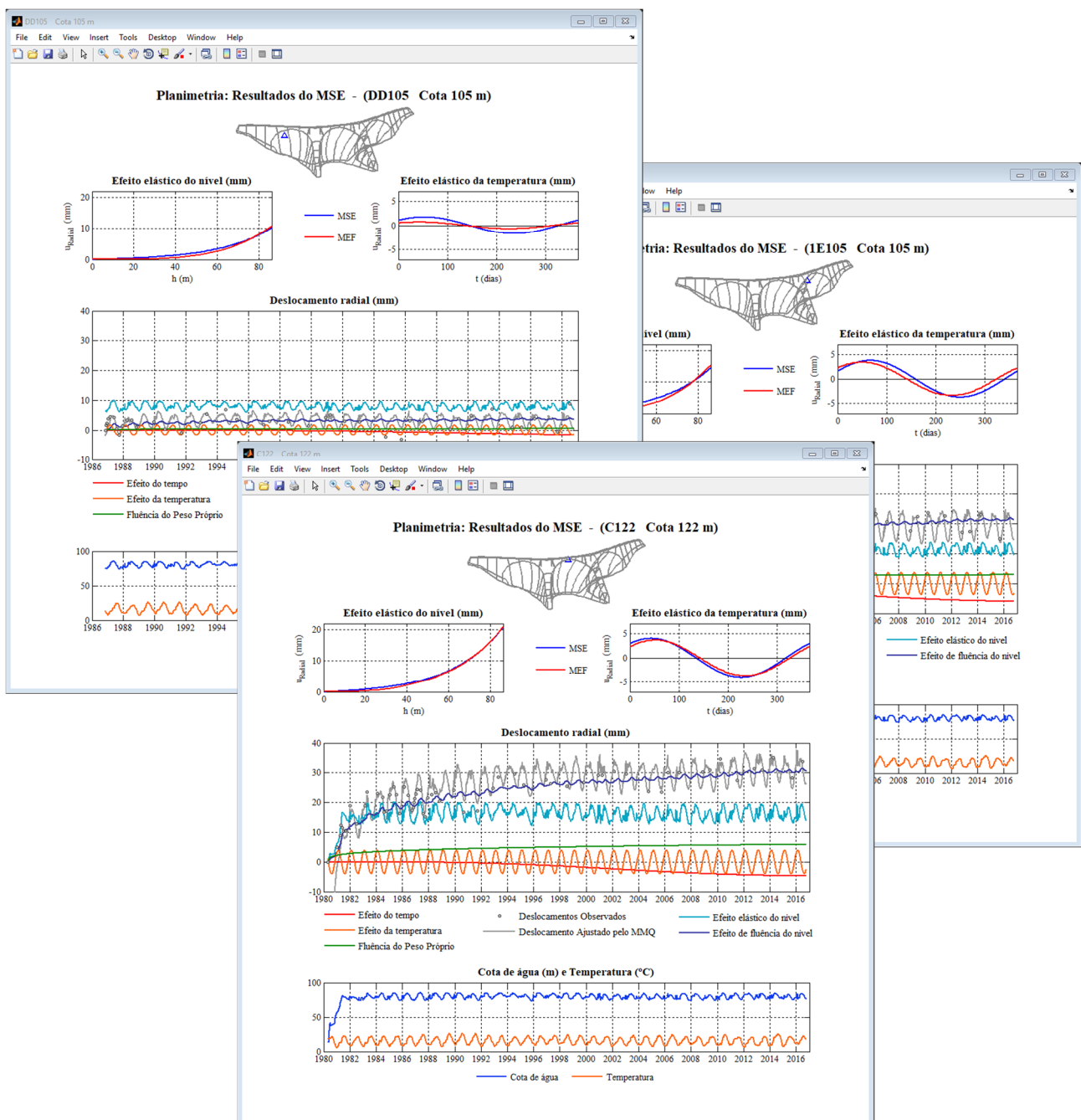


Figura 4.7 - Exemplos de gráficos do MSE para cada aparelho.

Por fim, na secção 2.6 fazem-se os gráficos onde são comparados os dois métodos. Juntam-se os resultados dos deslocamentos de cada aparelho, para que apareçam todos em simultâneo na barragem, e por baixo fica a imagem dos deslocamentos correspondentes calculados pelo MEF. Assim, para cada secção 2.6.1, 2.6.2 e 2.6.3 tem-se, respetivamente, os deslocamentos associados ao efeito elástico do nível, ao efeito da temperatura e ao efeito do tempo, ou seja, ao efeito das expansões. Na Figura 4.8 estão exemplos desses gráficos de comparações entre os métodos.

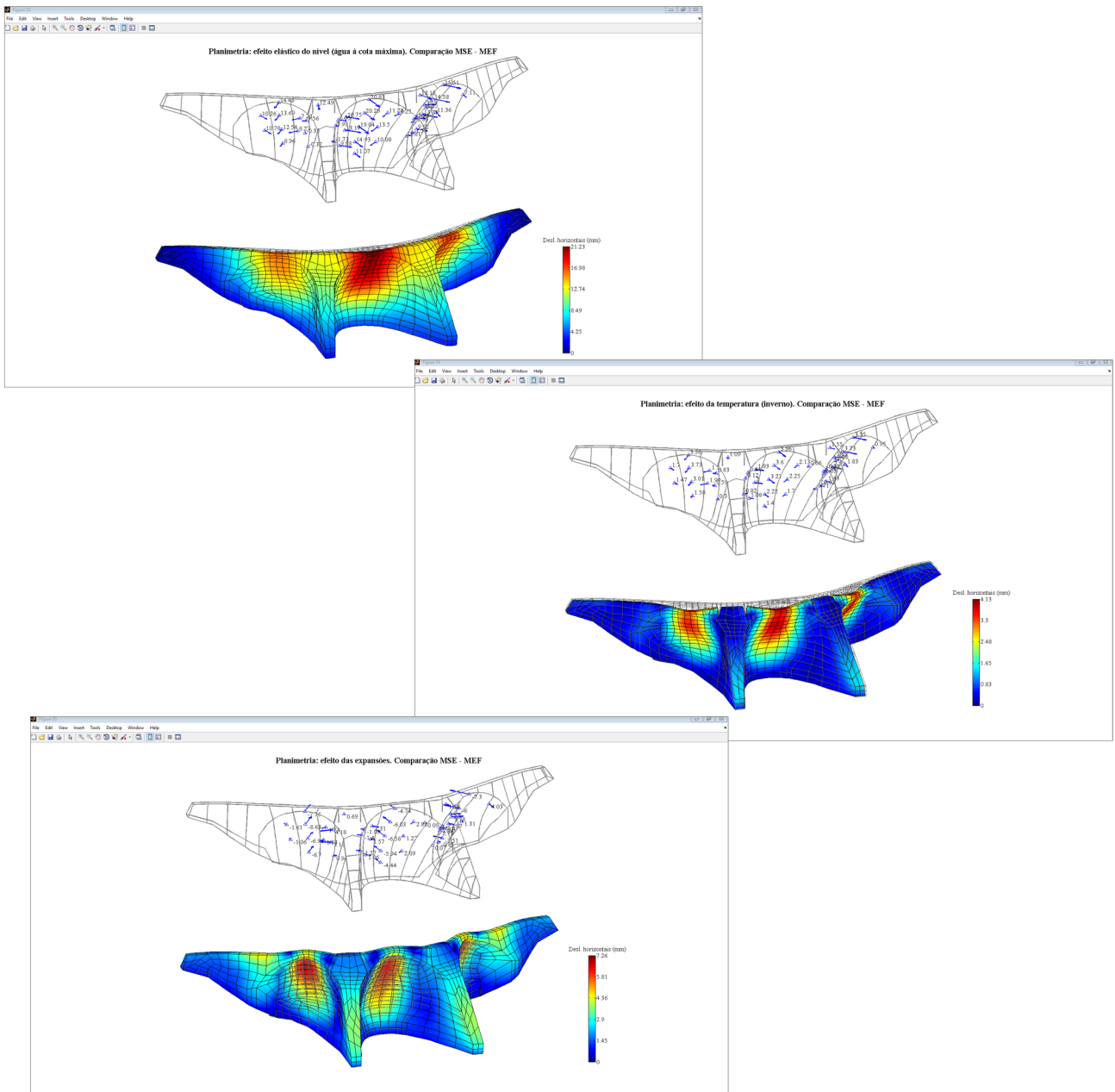


Figura 4.8 - Exemplos de gráficos de comparações entre os dois métodos MSE e MEF.

4.3 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a segunda componente do programa **DamSafe3.0** desenvolvido em MATLAB, no âmbito deste trabalho, que faz os cálculos associados ao modelo de separação de efeitos e as comparações entre esse método e o método dos elementos finitos, para a análise dos resultados dos deslocamentos da barragem da Aguieira. Com o desenvolvimento deste programa, foi possível adquirir maiores conhecimentos em termos de programação como também sobre a aplicação e importância do MSE no estudo, compreensão e análise dos efeitos presentes na barragem e no que cada um contribui para o deslocamento da barragem da Aguieira. Foi mostrada a organização do programa desenvolvido, desde a parte um, relativa ao MEF, onde se carregam os dados, os resultados e os gráficos da primeira componente do programa **DamSafe3.0**, até à parte dois, relativa ao MSE, onde foram feitos os cálculos dos parâmetros pelo MMQ e dos resultados para cada efeito, mostrando os gráficos para cada aparelho de observação. Foram mostradas as potencialidades do programa **DamSafe3.0** ao apenas ser necessário um programa para o estudo de qualquer ponto pertencente ao sistema de observação escolhido e para a possibilidade de se alterarem alguns dos parâmetros (p. ex. representação da fluência) e que tipo de alteração ao deslocamento provoca. Por último foram mostrados os gráficos que são gerados para a comparação do método dos elementos finitos e do método de separação de efeitos.

Conclui-se que hoje em dia, é cada vez mais importante conseguir-se tirar partido das ferramentas computacionais que vão sendo desenvolvidas em todo o mundo e, que se deve estar em atualização contínua às evoluções que vão surgindo. É cada vez mais imprescindível o conhecimento de ferramentas de cálculo que agilizem o processo e o tornem mais preciso. Todavia não se podem esquecer as bases, a forma manual de como se calcula, todo o processo teórico que está envolvido e implementado nas muitas linhas de código desenvolvidas.

5

Análise e interpretação do comportamento observado da barragem da Aguieira. Comparação de resultados de MEF e MSE

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo mostram-se as potencialidades dos dois módulos MEF e MSE, implementados no programa **DamSafe3.0** no âmbito desta dissertação, para apoio à análise e interpretação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a processos expansivos, apresentando-se, como exemplo de aplicação, o caso da barragem da Aguieira.

O comportamento estrutural da barragem da Aguieira é estudado com base na análise das histórias de deslocamentos observados com fios de prumo e por métodos geodésicos, planimetria e nivelamento geométrico de precisão.

Salienta-se o interesse da metodologia de separação de efeitos (MSE) implementada no **DamSafe3.0** para analisar a resposta observada ao longo do tempo, nomeadamente, refere-se o interesse da referida metodologia permitir a separação dos efeitos do tempo em três parcelas:

- i) Fluência associada à pressão hidrostática;
- ii) Fluência associada ao peso próprio (particularmente importante na análise dos deslocamentos verticais);
- iii) Efeito da ação expansiva.

Esta possibilidade, implementada no **DamSafe3.0**, de separação dos efeitos do tempo em duas parcelas de fluência, não patológicas, e numa parcela patológica, que neste caso corresponde ao efeito das expansões, é fundamental para o controlo da segurança.

Salienta-se a importância de conseguir uma correta separação de efeitos e o interesse de desenvolver ferramentas que permitam confirmar a coerência dos resultados da separação de efeitos, nomeadamente, ferramentas que facilitem a comparação dos resultados da separação de efeitos com resultados numéricos de modelos de elementos finitos, ou seja, ferramentas computacionais que permitam comparar graficamente os resultados do módulo MSE com os do módulo MEF: comparação MSE/MEF.

Esta coerência entre os resultados MSE e MEF deve ser conseguida globalmente, para todas as grandezas em análise nomeadamente, deslocamentos horizontais e verticais observados em vários pontos do corpo da obra, utilizando diferentes métodos de medição. Esta coerência deve ser obtida: i) em termos das linhas de influência do efeito elástico do nível da água e do correspondente efeito viscoelástico (fluência associada à pressão hidrostática); ii) em termos do efeito elástico das variações de temperatura; e iii) em termos do efeito das expansões ao longo do tempo, nos casos em que são identificados processos expansivos, como é o presente caso da barragem da Aguieira.

Para confirmar que se obtém a referida coerência entre resultados MSE e MEF é fundamental dispor de adequadas representações gráficas e, para tal, o **DamSafe3.0** está preparado com um módulo que permite a comparação gráfica de deformadas globais da obra identificadas separadamente para as várias ações com o módulo de separação de efeitos (MSE) e calculadas numericamente com o módulo de elementos finitos (MEF).

Salienta-se que o módulo MSE do **DamSafe3.0** permite efetuar separações de efeitos incorporando informação obtida a partir do módulo MEF, nomeadamente: i) permite que o efeito de fluência associado ao peso próprio seja estimado com base na aplicação de coeficientes de fluência aos valores do deslocamento elástico calculados pelo MEF para a ação do peso próprio; e ii) permite que a função representativa do efeito elástico do nível da água a considerar no MSE possa ser ajustada aos correspondentes valores calculados pelo MEF.

Por fim mostra-se que para se conseguir uma correta identificação da parcela de tempo associada ao efeito das expansões é da maior importância considerar uma função de fluência que represente adequadamente o real comportamento diferido do betão colocado em obra, que muitas vezes é afetado por fenómenos de deterioração evolutiva. Há que considerar que a fluência do betão integral colocado em obra pode ser significativamente superior à inicialmente estimada com base em ensaios de provetes intactos de betão crivado. Ou seja, nos MSE há que considerar funções de fluência representativas de todos os efeitos diferidos considerando a possibilidade de que a resposta de fluência/diferida pode ser afetada ao longo dos anos por processos de deterioração evolutiva associados, por exemplo, ao desenvolvimento de gel resultante de reações álcali-sílica, ao desenvolvimento de microfissuração interna, de fissuração e fendilhação, etc.

5.2 Aparelhos de observação

Neste estudo analisam-se deslocamentos horizontais medidos com base em métodos geodésicos (planimetria) e recorrendo a fios de prumo, e deslocamentos verticais ao nível do coroamento medidos por nivelamento geométrico de precisão.

Quanto aos deslocamentos horizontais medidos por geodesia consideram-se resultados referentes a 41 marcas geodésicas, colocadas no paramento de jusante, como se mostra na Figura 5.1.

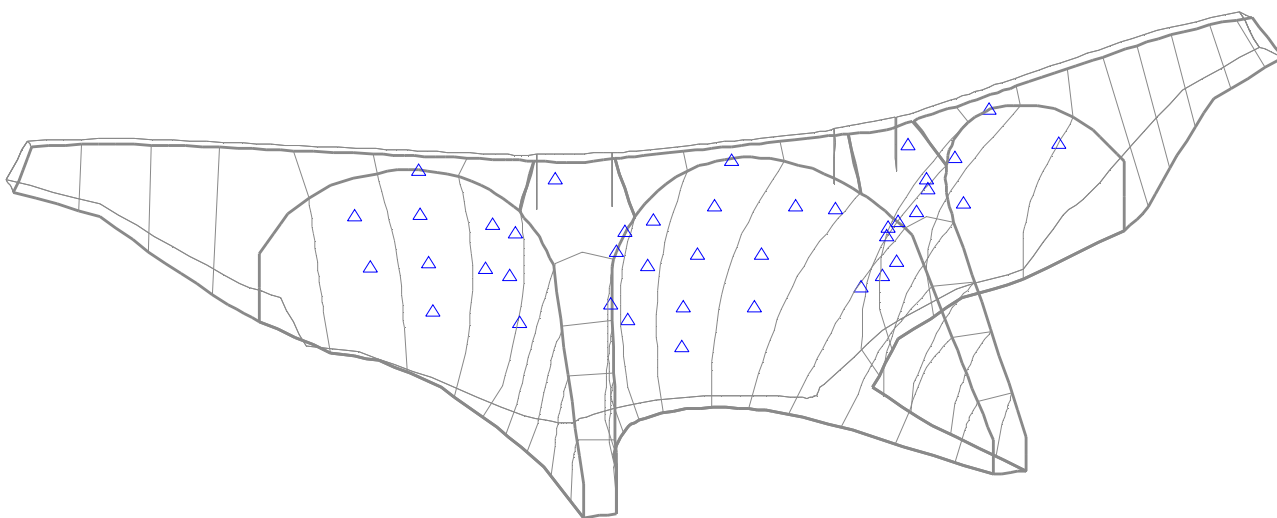


Figura 5.1 - Medição de deslocamentos horizontais por geodesia. Localização das marcas geodésicas.

Em relação aos fios de prumo é de referir que existem na obra um total de 12 fios de prumo invertidos com um total de 42 bases de coordenómetro, analisando-se resultados referentes a 30 bases de coordenómetro colocadas no corpo da barragem. Na Figura 5.2 a) e 5.2 b) mostram-se todos os fios de prumo, em planta e em alçado, e na Figura 5.2 c) mostram-se em perspetiva todas as bases de coordenómetro consideradas neste trabalho.

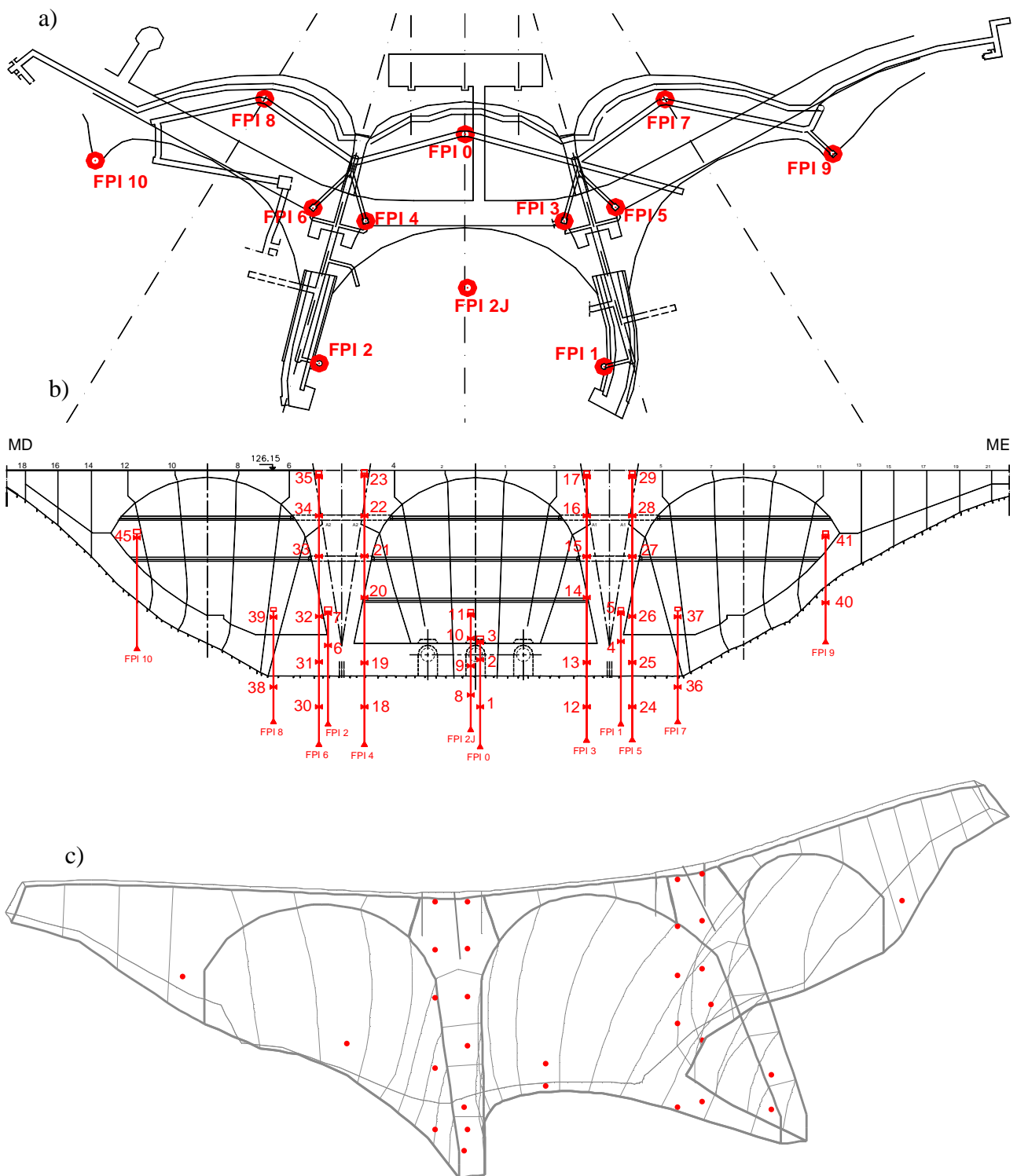


Figura 5.2 - Medição de deslocamentos horizontais com fios de prumo. a) Localização dos fios de prumo, em planta; b) Localização das bases de coordenómetro em alçado; c) Localização das bases de coordenómetro, em perspectiva.

Quanto aos deslocamentos verticais do coroamento estes são medidos em 21 marcas de nivelamento tendo-se analisado neste trabalho resultados referentes apenas às 16 marcas indicadas na Figura 5.3.

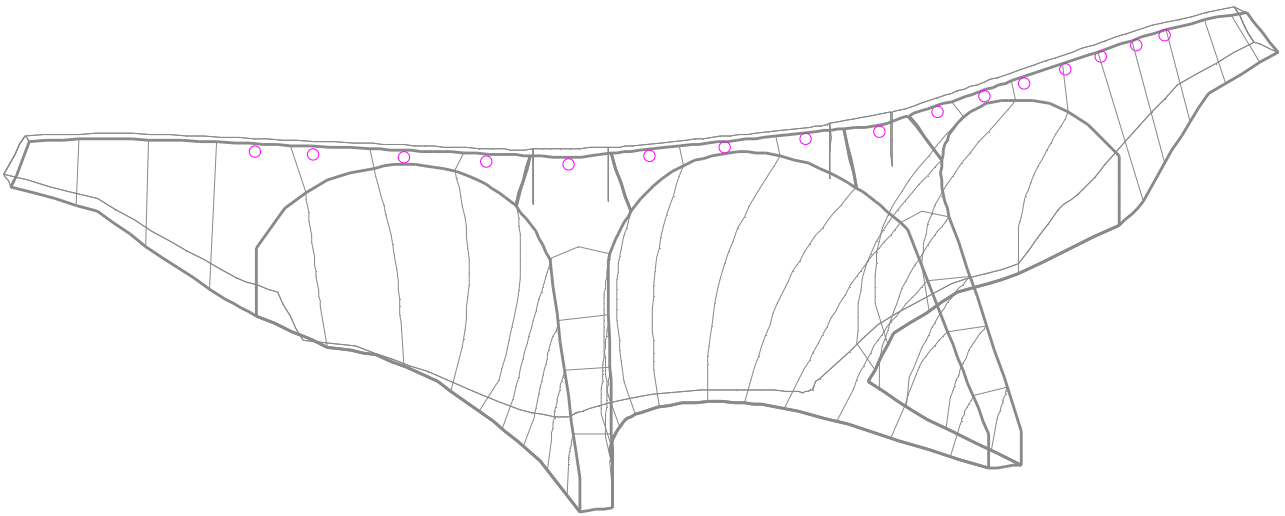


Figura 5.3 - Medição de deslocamentos verticais no coroamento. Localização das marcas de nivelamento.

Na Figura 5.4 mostram-se, em conjunto, todos os pontos de medição de deslocamentos considerados: marcas geodésicas, marcas de nivelamento e bases de coordenómetro.

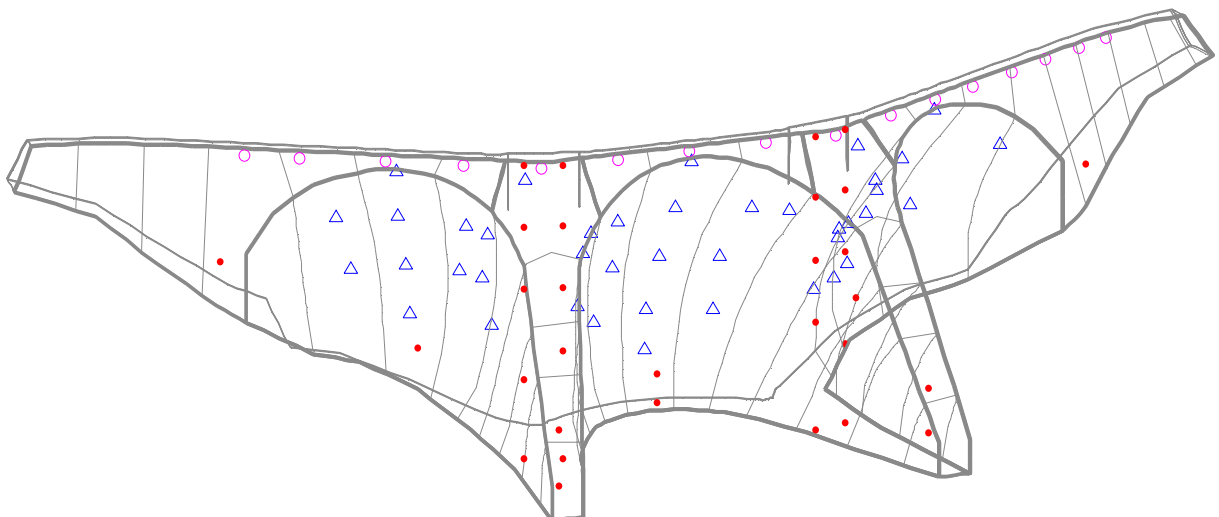


Figura 5.4 - Localização de todos os aparelhos de observação cujos resultados são analisados neste trabalho: marcas de nivelamento, marcas geodésicas (planimetria), bases de coordenómetro em fios de prumo.

5.3 Análise de deslocamentos radiais medidos por geodesia

Neste ponto utiliza-se o programa **DamSafe3.0** (módulos MSE e MEF) para analisar as histórias de deslocamentos radiais medidos por geodesia desde a fase de primeiro enchimento até 2016, ou seja, no período de 1980 a 2016.

Neste caso considera-se para todos os pontos o seguinte modelo de separação de efeitos:

- Efeito elástico do nível (EEN) representado por uma curva definida por uma função exponencial do tipo $a(e^{h/25} - 1)$ em que o parâmetro a é previamente fixado para se ajustar à curva calculada pelo MEF;
- Efeito elástico da temperatura (EET) representado por uma curva harmónica:
$$b_1 \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}}{365,25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}}{365,25}\right);$$
- Efeito de fluência do nível (fluência associada à pressão hidrostática) simulado com base na aplicação de coeficientes de fluência à resposta elástica correspondente à história do nível discretizada mensalmente em patamares constantes, e admitindo para o betão a lei de fluência de Bazant e Panula com $E_0 = 41,5 \text{ GPa}$, $\varphi_1 = 1,6$, $\beta = 0,05$, $m = 0,33$, $n = 0,22$ (correspondente a um betão moderadamente deteriorado devido a expansões);
- Efeito de fluência associado ao peso próprio estimado com base na aplicação de coeficientes de fluência aos deslocamentos elásticos calculados pelo MEF para a ação do peso próprio;
- Efeito do tempo devido a expansões dado por uma curva do tipo sigmóide dada pela expressão $c \times \left(1 - e^{-t^n/\beta}\right)$, com $\beta = t_{hs}^n \times n / (n - 1)$, sendo $n = 3,258$ e $t_{hs}^n = 8000$ dias.

Como referido atrás os resultados do MSE são comparados com os do MEF, em termos de linhas de influência e em termos de deformadas globais. Na Figura 5.10 mostram-se os resultados dos deslocamentos radiais para todos os pontos de geodesia analisados e as respetivas deformadas globais para o efeito elástico do nível, o efeito da temperatura e o efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.3.1 Ponto no centro da abóbada central, à cota 122 m: ponto C122

O ponto C122 situa-se a meio da abóbada central à cota de 122 m, como se pode ver na Figura 5.5 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos obtidos com o programa **DamSafe3.0**. É notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a

cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 21 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é para jusante no inverno (+4 mm) e para montante no verão (-4 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um bom ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento referido em 2.4.2.4, um ligeiro aumento do deslocamento para jusante ao longo do tempo (neste ponto o deslocamento elástico devido ao peso próprio é para jusante).

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem uma variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar, existindo um ligeiro desfasamento, da ordem de um mês entre a subida/descida da temperatura e a resposta da obra em termos de deslocamento radial para montante/jusante.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 30 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para montante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 4,5 mm entre 1980 e 2016.

5.3.2 Ponto no centro da abóbada direita, à cota 122 m: ponto D122

O ponto D122 situa-se a meio da abóbada direita à cota de 122 m, como se pode ver na Figura 5.6 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 14 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+4 mm) e para montante no verão (-4 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se igualmente que há um bom ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um ligeiro aumento do deslocamento para jusante ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como no caso anterior, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 22 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para montante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 8 mm entre 1980 e 2016, superior, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto C122.

5.3.3 Ponto no centro da abóbada esquerda, à cota 122 m: marca geodésica E122

O ponto E122 situa-se a meio da abóbada esquerda à cota de 122 m, como se pode ver na Figura 5.7 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. Este é um ponto simétrico ao ponto anterior D122 relativamente à sua localização na barragem. É igualmente notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 15 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+4 mm) e para montante no verão (-4 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se igualmente que há um bom ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um ligeiro aumento do deslocamento para jusante ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos anteriores, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 23 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para montante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 8 mm entre 1980 e 2016, igual, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto D122,

constatando-se assim valores superiores de expansões nas abóbadas laterais e inferior na abóbada central.

5.3.4 Ponto na secção central da abóbada central, à cota 87 m: marca geodésica 3C87

O ponto 3C87 situa-se na zona central da abóbada central à cota de 87 m, como se pode ver na Figura 5.8 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente possível constatar-se o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 19 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+3 mm) e para montante no verão (-3 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se também que existe um bom ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um ligeiro aumento do deslocamento para jusante ao longo do tempo, mas inferior aos pontos anteriores.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos anteriores, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a mesma típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 28 mm para jusante, neste caso maior do que o ponto C122.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para montante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 6 mm entre 1980 e 2016, superior, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto C122.

5.3.5 Ponto na secção central da abóbada central, à cota 57 m: marca geodésica C57

O ponto C57 situa-se igualmente na zona central da abóbada central, mas à cota de 57 m, como se pode ver na Figura 5.9 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. Pode-se ver o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 10 mm para a água à cota máxima, o que diminui, portanto, em comparação com o ponto anterior 3C87; no segundo,

referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+2 mm) e para montante no verão (-2 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se igualmente o bom ajuste conseguido entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um ligeiro aumento do deslocamento para jusante ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos anteriores, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 16 mm para jusante, no entanto o valor vai decrescendo à medida que a cota tem valores mais baixos.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para montante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 4 mm entre 1980 e 2016, inferior, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto 3C87.

Planimetria: Resultados do MSE - (C122 Cota 122 m)

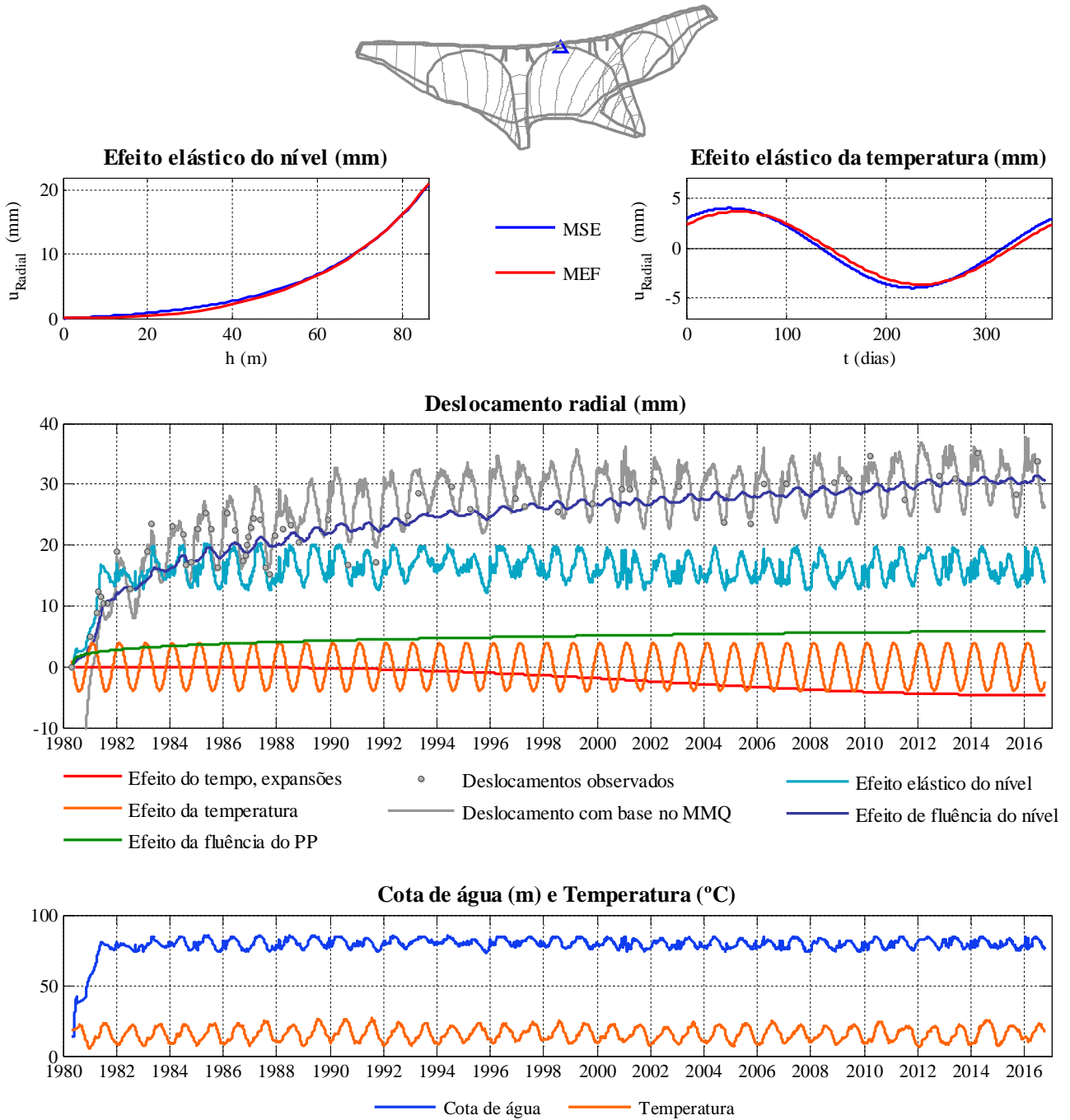


Figura 5.5 - Geodesia. Análise do deslocamento radial no centro da abóbada central à cota 122 m (marca geodésica C122) com o programa **DamSafe3.0**. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF.

Planimetria: Resultados do MSE - (D122 Cota 122 m)

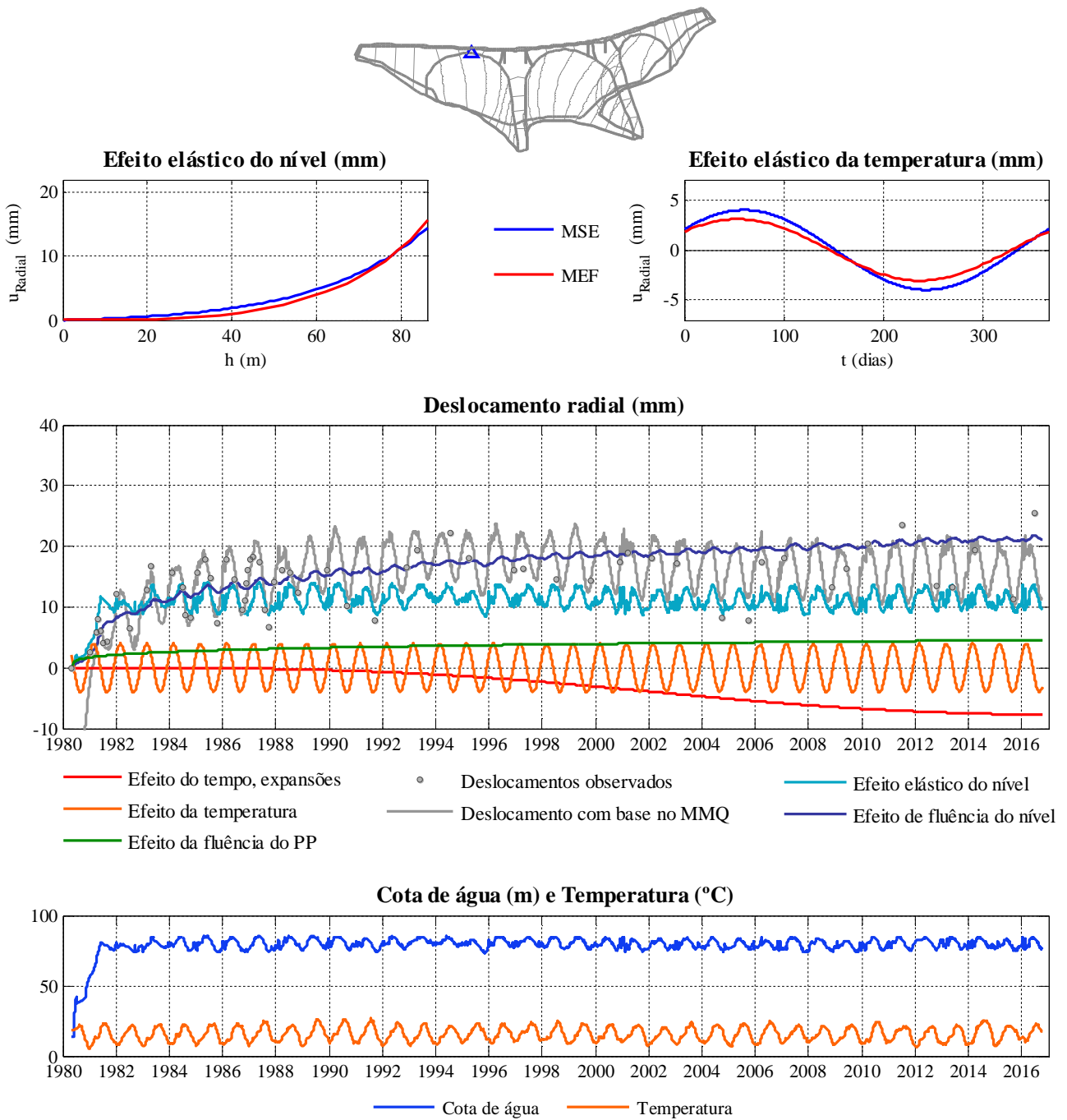


Figura 5.6 - Geodesia. Análise do deslocamento radial no centro da abóbada direita à cota 122 m (marca geodésica D122) com o programa **DamSafe3.0**. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF.

Planimetria: Resultados do MSE - (E122 Cota 122 m)

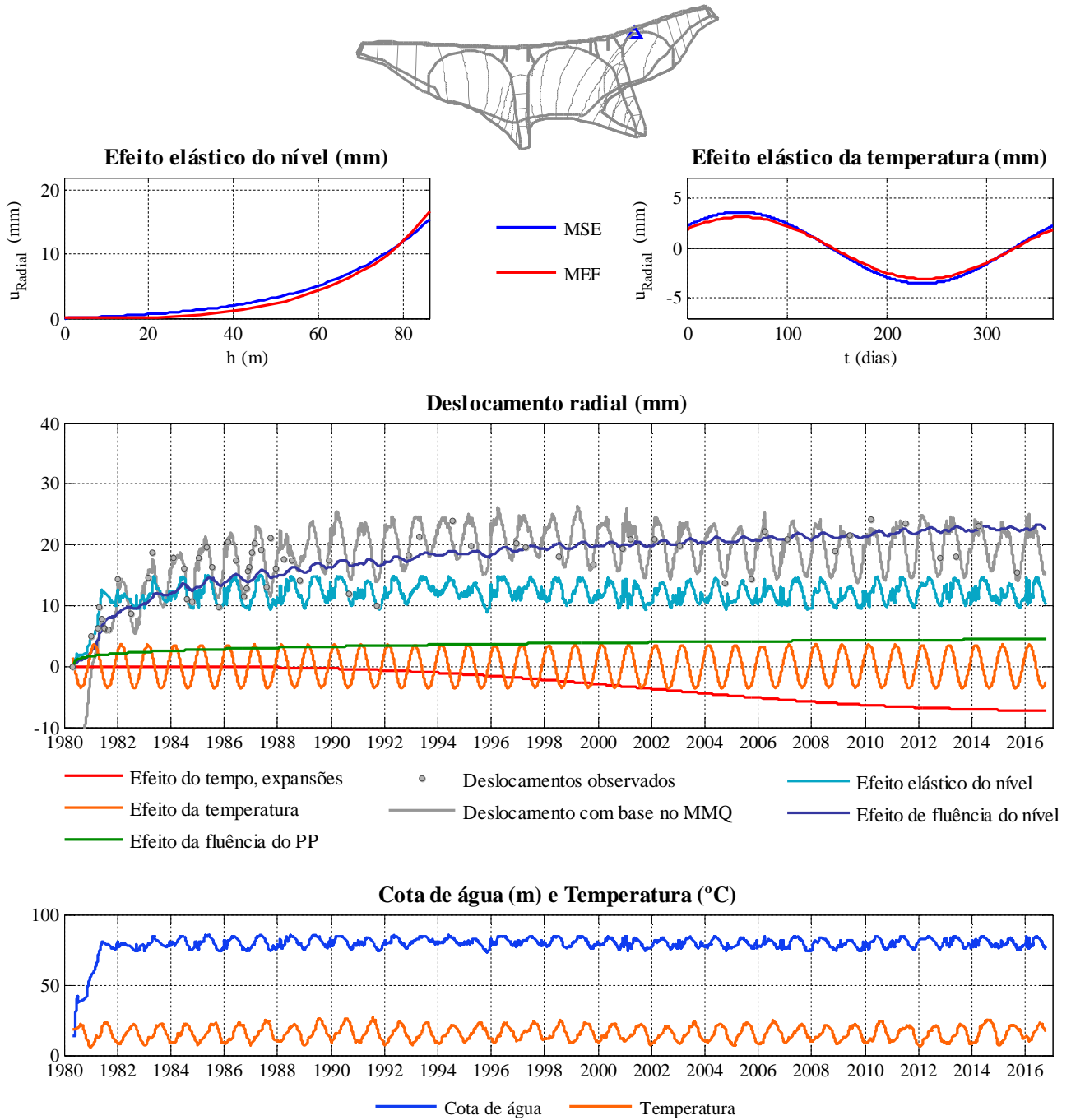


Figura 5.7 - Geodesia. Análise do deslocamento radial no centro da abóbada esquerda à cota 122 m (marca geodésica E122) com o programa **DamSafe3.0**. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF.

Planimetria: Resultados do MSE - (3C87 Cota 87 m)

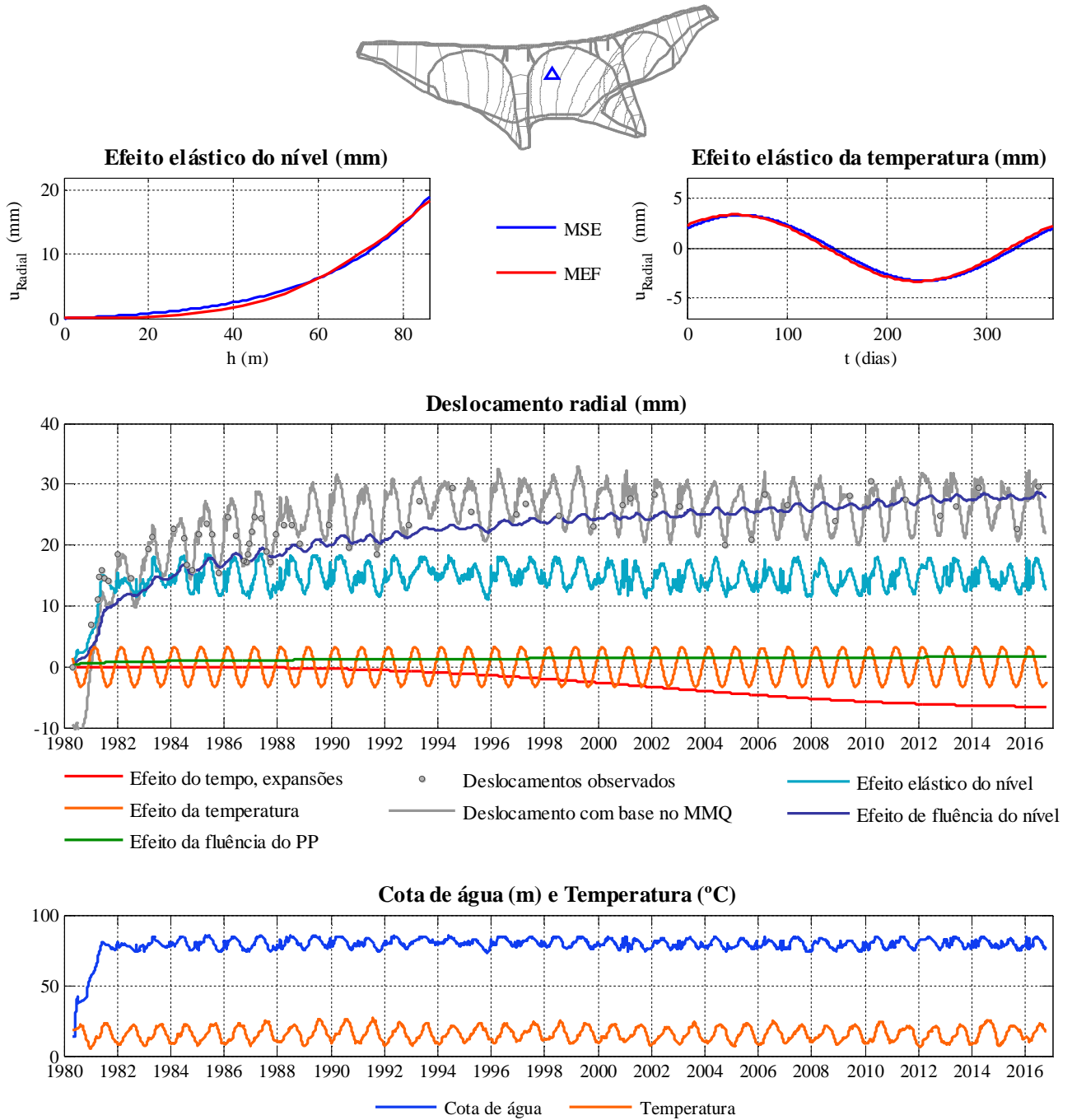


Figura 5.8 - Geodesia. Análise do deslocamento radial na secção central da abóbada central à cota 87 m (marca geodésica 3C87) com o programa **DamSafe3.0**. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF.

Planimetria: Resultados do MSE - (C57 Cota 57 m)

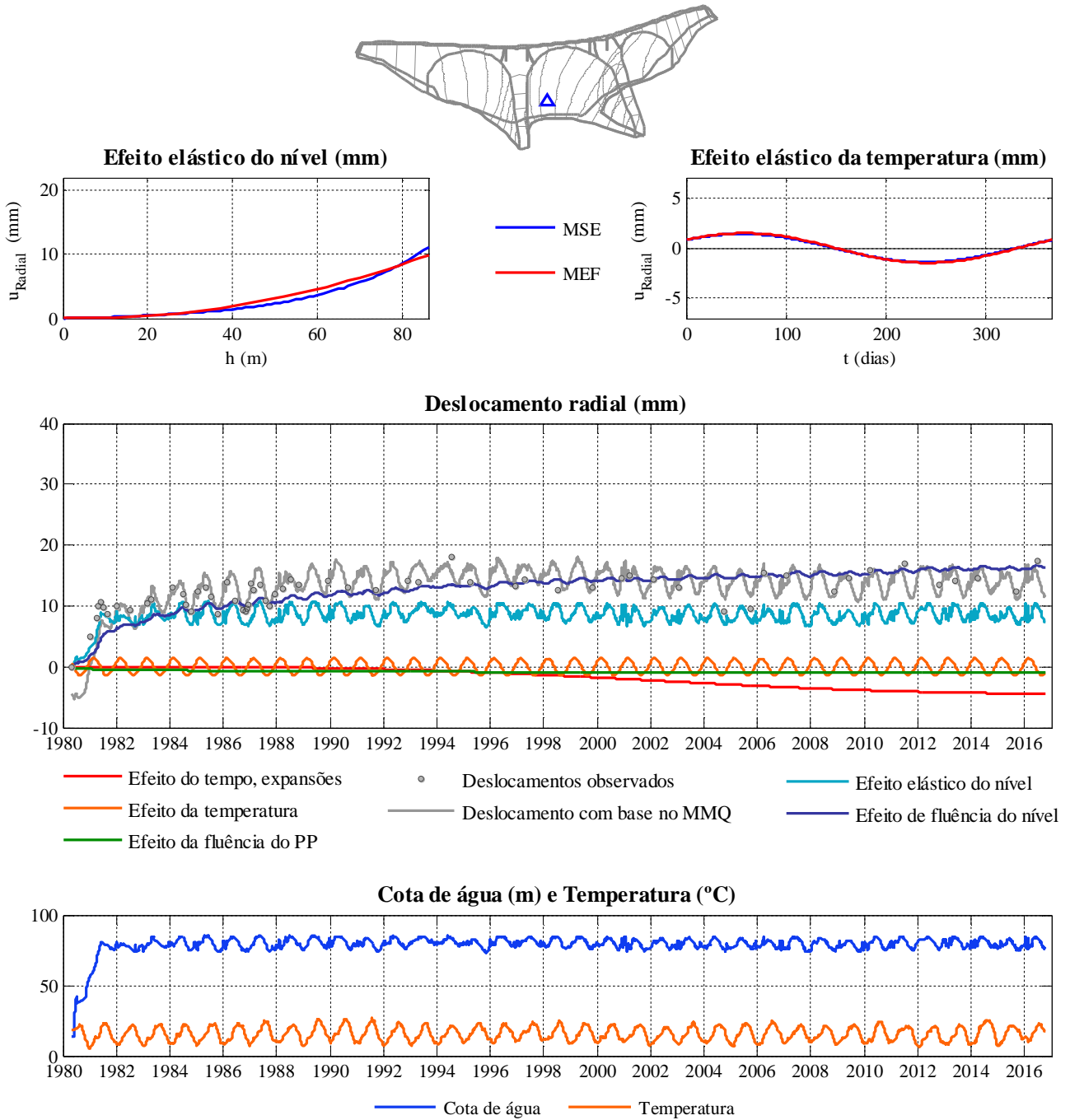
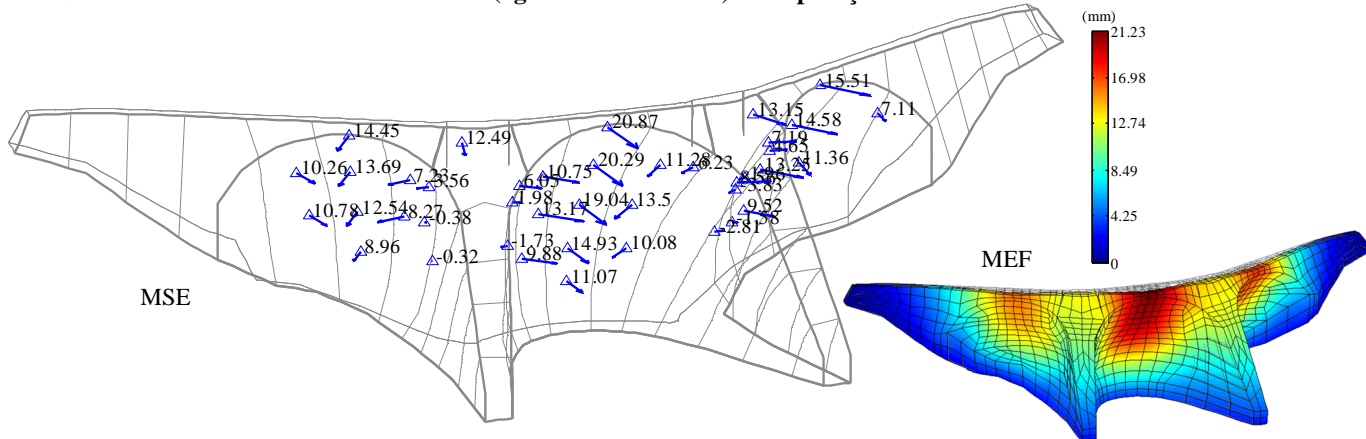
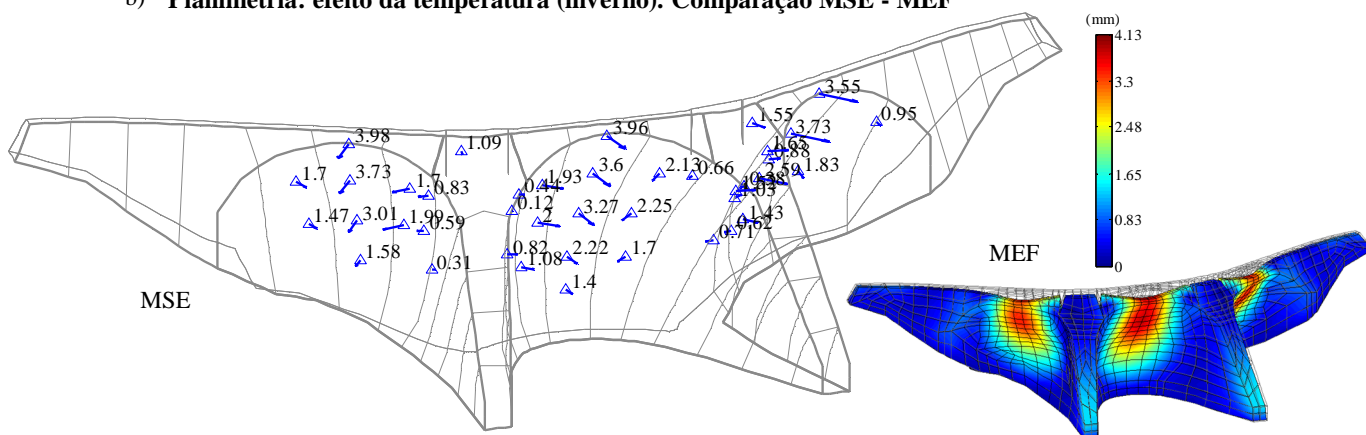


Figura 5.9 - Geodesia. Análise do deslocamento radial na secção central da abóbada central à cota 57 m (marca geodésica C57) com o programa **DamSafe3.0**. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF.

a) **Planimetria: efeito elástico do nível (água à cota máxima). Comparação MSE - MEF**



b) **Planimetria: efeito da temperatura (inverno). Comparação MSE - MEF**



c) **Planimetria: efeito das expansões. Comparação MSE - MEF**

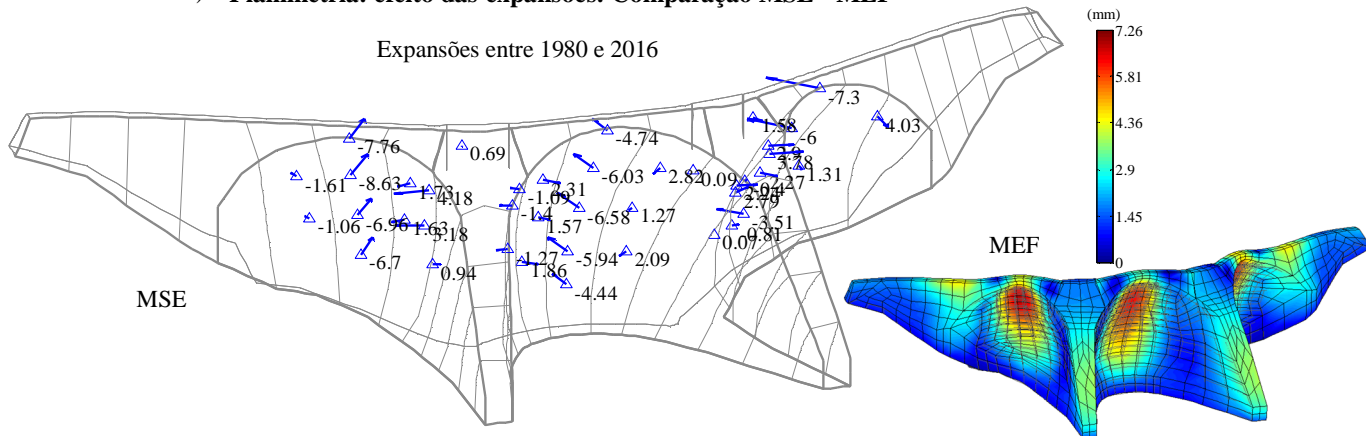


Figura 5.10 - Geodésia: deslocamentos radiais. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF. Deformadas globais obtidas com o programa **DamSafe3.0**: a) Efeito elástico do nível (água à cota do coroamento); b) Efeito da temperatura (arrefecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual); e c) Efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.4 Análise de deslocamentos radiais medidos por fio de prumo

Neste ponto o programa **DamSafe3.0** é utilizado para analisar as histórias de deslocamentos radiais medidos por fio de prumo no período de 1980 a 2016.

Neste caso considera-se o seguinte modelo de separação de efeitos:

- Efeito elástico do nível (EEN) representado por uma curva definida por uma função exponencial do tipo $a(e^{h/20} - 1)$;
- Efeito elástico da temperatura (EET) representado por uma curva proporcional à temperatura do ar com uma defasagem correspondente a um atraso 30 dias, ou seja, do tipo $b.T(t - 30)$;
- Efeito de fluência do nível (fluência associada à pressão hidrostática) simulado com base na aplicação de coeficientes de fluência à resposta elástica correspondente à história do nível discretizada mensalmente em patamares constantes, e admitindo para o betão uma lei de fluência de Bazant e Panula com $E_0 = 41,5 GPa$, $\varphi_1 = 1,6$, $\beta = 0,05$, $m = 0,33$, $n = 0,22$ (correspondente a um betão moderadamente deteriorado devido a expansões);
- Efeito de fluência associado ao peso próprio estimado com base na aplicação de coeficientes de fluência aos deslocamentos elásticos calculados pelo MEF para a ação do peso próprio;
- Efeito do tempo devido a expansões dado por uma curva do tipo sigmóide dada pela expressão $c \times (1 - e^{-t^n/\beta})$, com $\beta = t_{hs}^n \times n/(n-1)$, sendo $n = 3,258$ e $t_{hs}^n = 8000$ dias.

Como no caso anterior, os resultados do MSE são comparados com os do MEF, em termos de linhas de influência e em termos de deformadas globais. Na Figura 5.15 mostram-se os resultados dos deslocamentos radiais para todos os pontos de fios de prumo analisados e as respetivas deformadas globais para o efeito elástico do nível, o efeito da temperatura e o efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.4.1 Fio de prumo FPI6. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada direita, junto à cabeça do contraforte

A base de coordenómetro do fio de prumo FPI6 situa-se na abóbada direita, junto à cabeça do contraforte à cota 123,8 m, como se pode ver na Figura 5.11 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura, não tão bom quanto os aparelhos anteriores uma vez que não foi fixado o parâmetro do efeito elástico do nível. No primeiro, pode-se

verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 8 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+1,5 mm) e para montante no verão (-1,5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

Pode-se observar que, mesmo não fixando o parâmetro do efeito elástico do nível, no gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que existe um ótimo ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados, uma vez que existem bastantes leituras, ou seja, existem dados suficientes para que se consiga um bom ajuste.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio não tem expressão neste caso, uma vez que se mantém praticamente nula ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos referentes à geodesia, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem uma variação correspondente a uma curva proporcional à temperatura do ar com uma defasagem de aproximadamente um atraso de 30 dias.

A parcela correspondente ao de efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 10 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para jusante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 2 mm entre 1980 e 2016.

5.4.2 Fio de prumo FPI5. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada esquerda, junto à cabeça do contraforte

A base de coordenómetro do fio de prumo FPI5 situa-se na abóbada esquerda, junto à cabeça do contraforte à cota 123,8 m, como se pode ver na Figura 5.12 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 7,5 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para jusante no inverno (+1,5 mm) e para montante no verão (-1,5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

Pode-se observar que, mesmo não fixando o parâmetro do efeito elástico do nível, no gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que existe, tal como no ponto anterior, um ótimo ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados, uma vez que existem dados suficientes para que se consiga um bom ajuste.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio não tem igualmente expressão, tal como no ponto anterior, uma vez que se mantém também praticamente nula ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos referentes à geodesia, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem uma variação correspondente a uma curva proporcional à temperatura do ar com uma defasagem de aproximadamente um atraso de 30 dias.

A parcela correspondente ao de efeito de fluência do nível mostra, como esperado e tal como o ponto anterior, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 10 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para jusante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 2 mm entre 1980 e 2016, igual, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto anterior.

5.4.3 Fio de prumo FPI4. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada central no lado direito, junto à cabeça do contraforte

A base de coordenómetro do fio de prumo FPI4 situa-se na abóbada central no lado direito, junto à cabeça do contraforte à cota 123,8 m, como se pode ver na Figura 5.13 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 7 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento está desencontrado, isto é, para no inverno o MSE indica valores para jusante (+1 mm) e para montante no verão (-1 mm), contudo a curva referente ao MEF tem o andamento contrário.

Pode-se observar que, mesmo não fixando o parâmetro do efeito elástico do nível, no gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que existe, tal como no ponto anterior, um ótimo ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados, uma vez que existem dados suficientes para que se consiga um bom ajuste.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem ligeira expressão para jusante, ao invés do comportamento praticamente nulo dos pontos anteriores.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos referentes à geodesia, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem uma variação correspondente a uma curva proporcional à temperatura do ar com uma defasagem de aproximadamente um atraso de 30 dias.

A parcela correspondente ao de efeito de fluência do nível mostra, como esperado e tal como os pontos anteriores, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 10 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para jusante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 3 mm entre 1980 e 2016, ligeiramente superior, portanto, aos correspondentes valores do efeito da expansão identificados nos pontos anteriores.

5.4.4 Fio de prumo FPI3. Análise do deslocamento radial medido na base de coordenómetro à cota 123,8 m, na abóbada central no lado esquerdo, junto à cabeça do contraforte

A base de coordenómetro do fio de prumo FPI3 situa-se na abóbada central no lado esquerdo, junto à cabeça do contraforte à cota 123,8 m, como se pode ver na Figura 5.14 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o bom ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento radial para jusante com um valor máximo da ordem de 7,5 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento está igualmente desencontrado, isto é, para no inverno o MSE indica valores para jusante (+1 mm) e para montante no verão (-1 mm), contudo a curva referente ao MEF tem o andamento contrário.

Pode-se observar que, mesmo não fixando o parâmetro do efeito elástico do nível, no gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que existe, tal como no ponto anterior, um ótimo ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados, uma vez que existem dados suficientes para que se consiga um bom ajuste.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem ligeira expressão para jusante, tal como no ponto anterior.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que, como nos casos referentes à geodesia, a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem uma variação correspondente a uma curva proporcional à temperatura do ar com uma defasagem de aproximadamente um atraso de 30 dias.

A parcela correspondente ao de efeito de fluência do nível mostra, como esperado e tal como os pontos anteriores, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 11 mm para jusante.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos radiais para jusante, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 3 mm entre 1980 e 2016, igual, portanto, ao correspondente valor do efeito da expansão identificado no ponto anterior.

Fios de Prumo: Comparação entre os resultados do MSE e MEF - (FPI6 Cota 123.8 m)

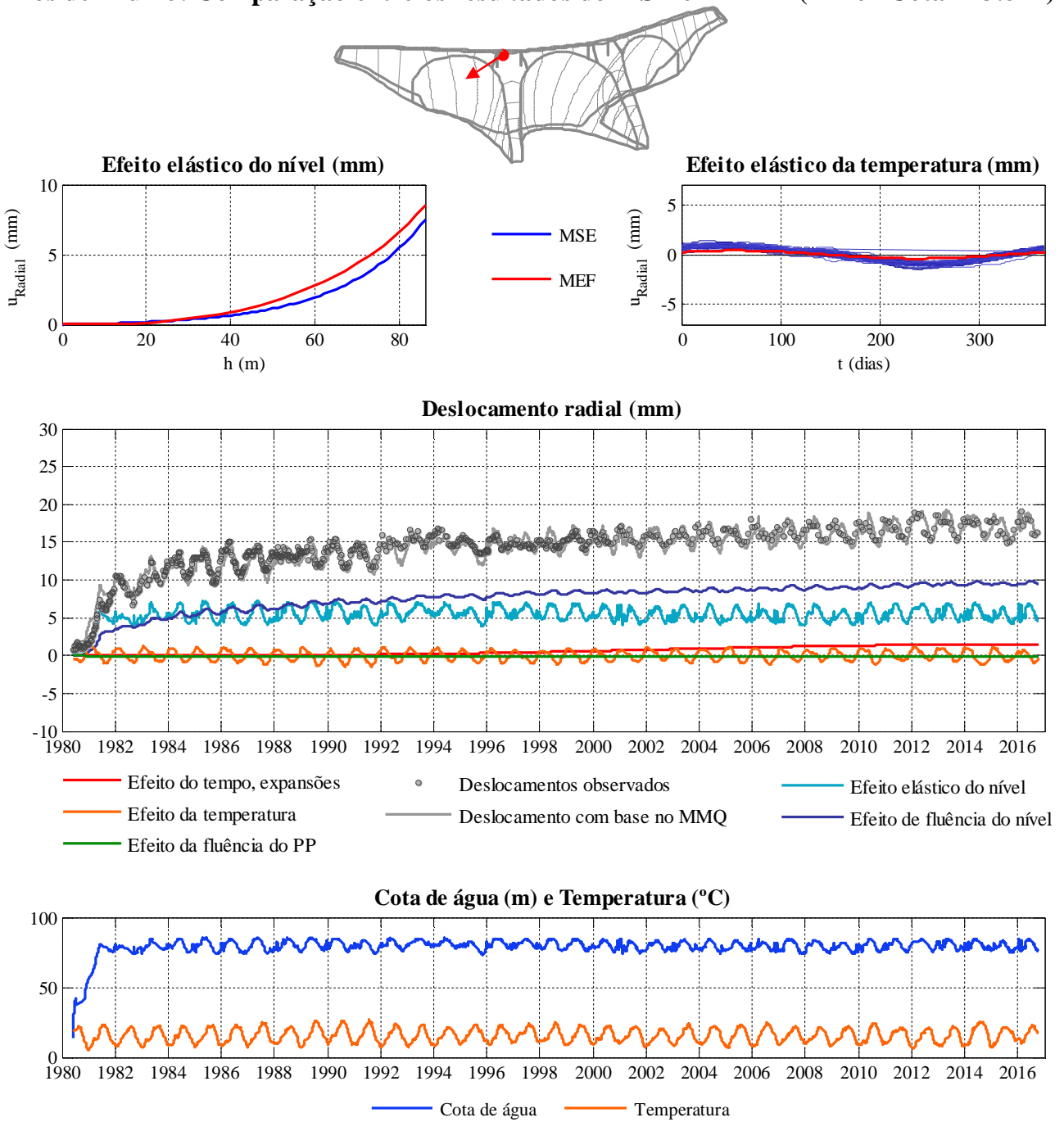


Figura 5.11 - Fios de prumo, deslocamento radial no ponto FPI6 à cota 123,8 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Fios de Prumo: Comparação entre os resultados do MSE e MEF - (FPI5 Cota 123.8 m)

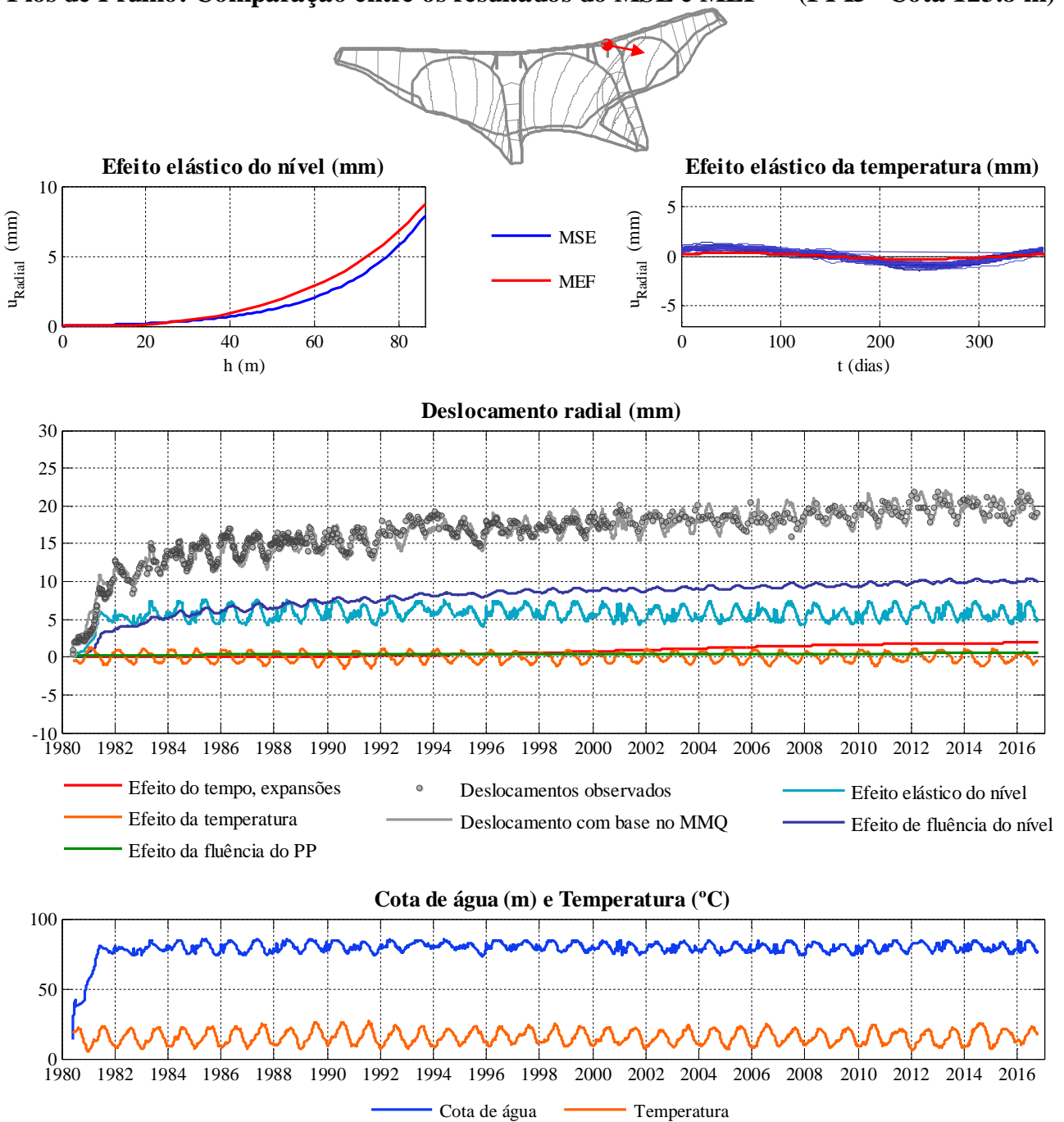


Figura 5.12 - Fios de prumo, deslocamento radial no ponto FPI5 à cota 123,8 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Fios de Prumo: Comparação entre os resultados do MSE e MEF - (FPI4 Cota 123.8 m)

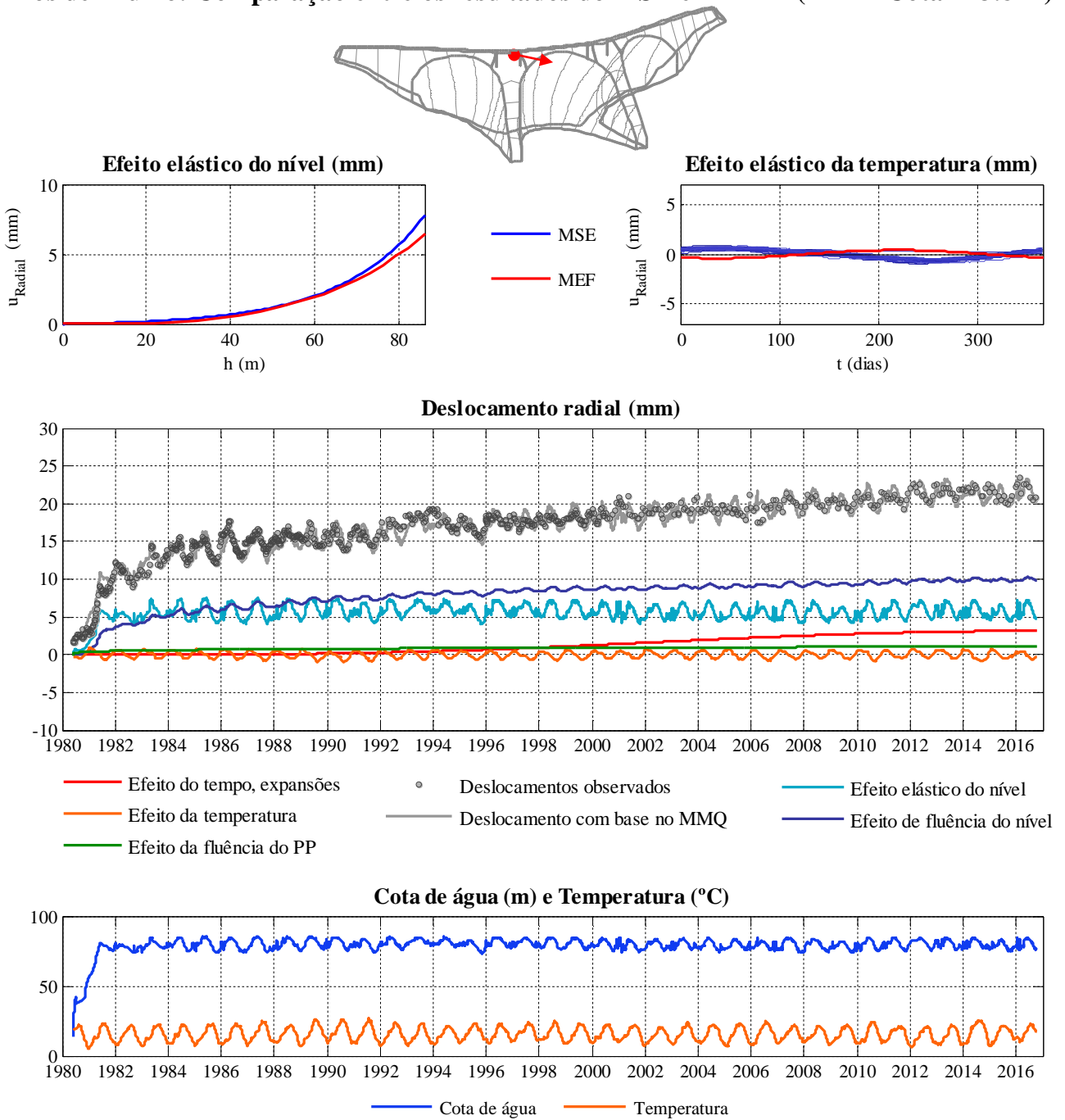


Figura 5.13 - Fios de prumo, deslocamento radial no ponto FPI4 à cota 123,8 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Fios de Prumo: Comparação entre os resultados do MSE e MEF - (FPI3 Cota 123.8 m)

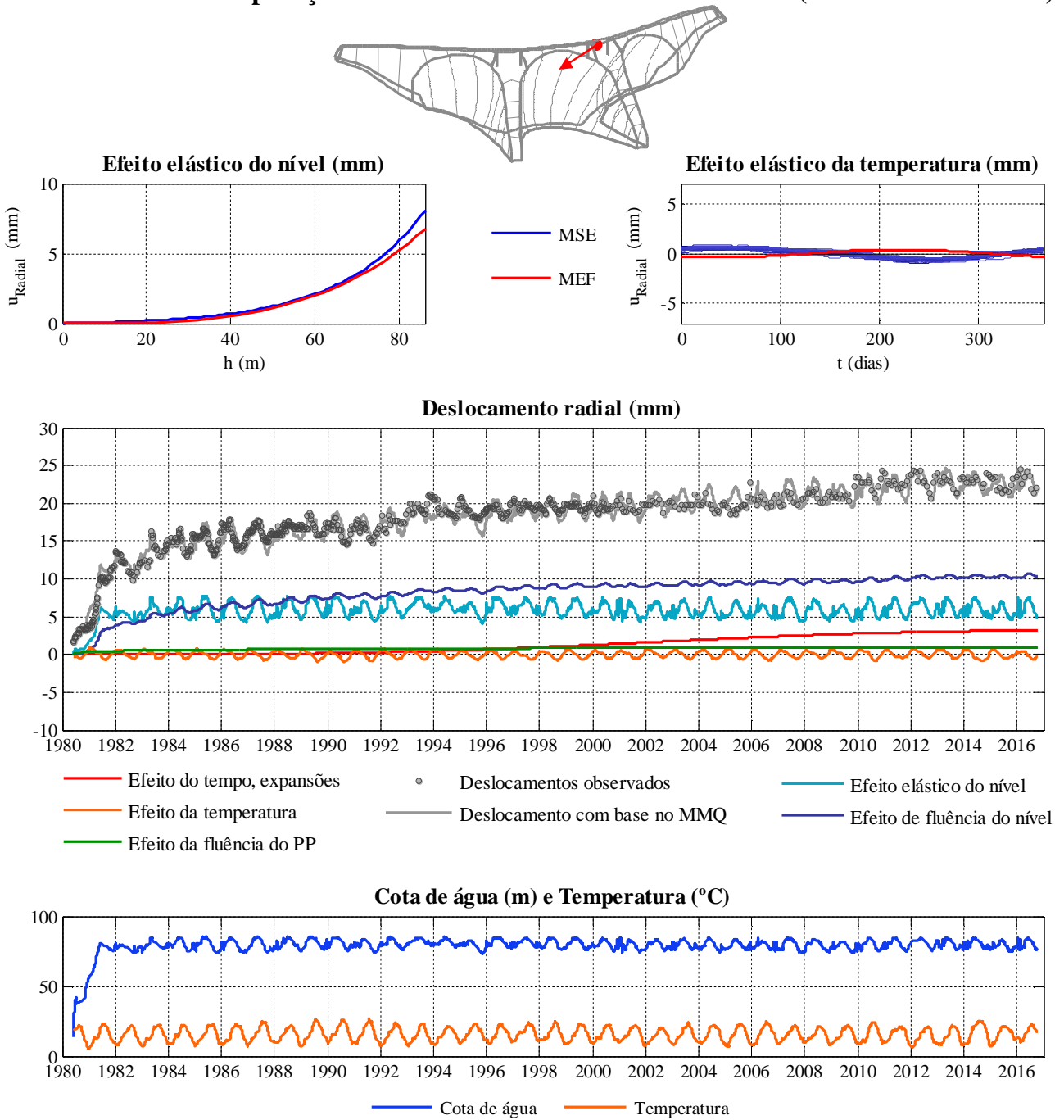


Figura 5.14 - Fios de prumo, deslocamento radial no ponto FPI3 à cota 123,8 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

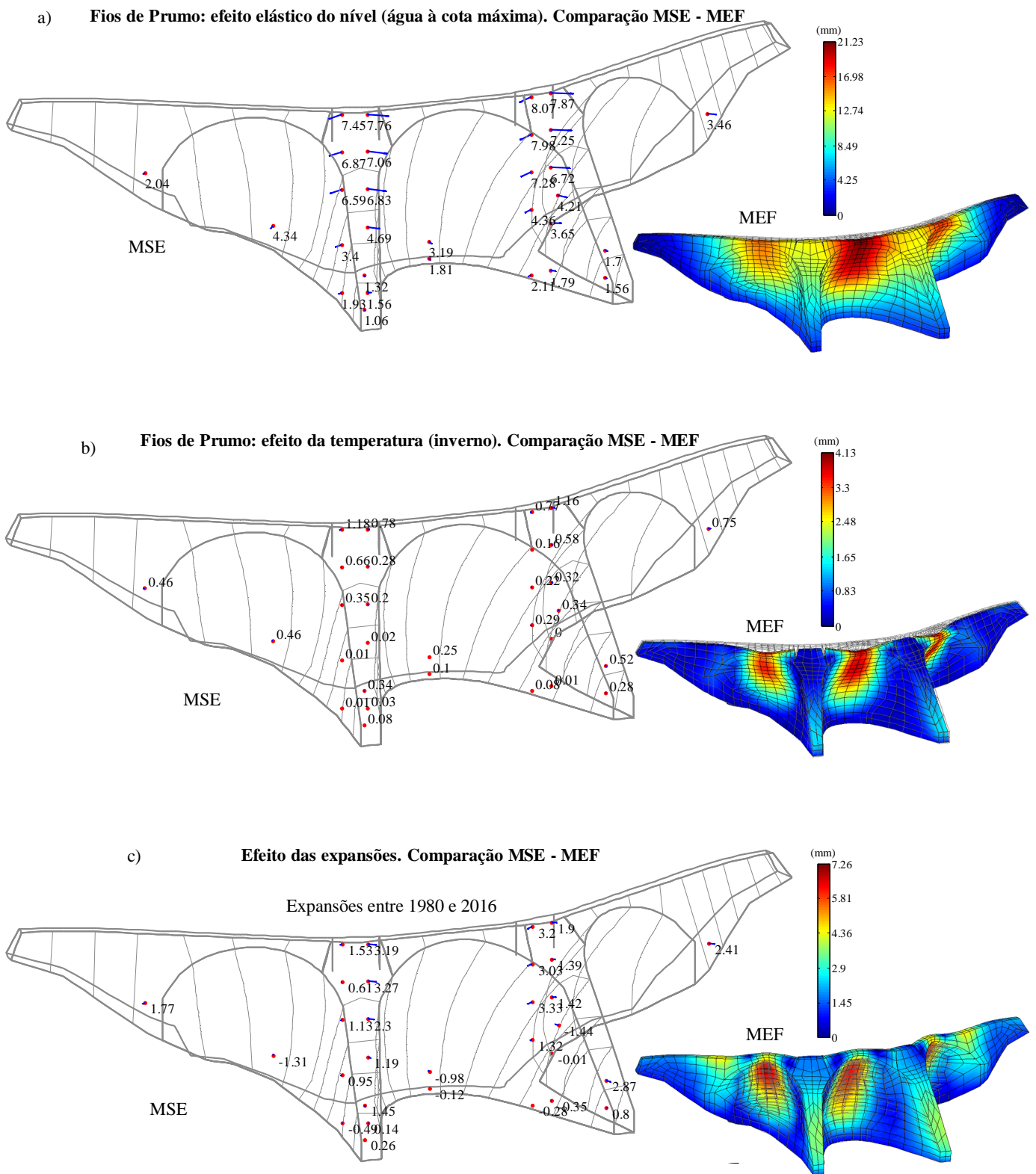


Figura 5.15 - Fios de prumo: deslocamentos radiais. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF. Deformadas globais obtidas com o programa **DamSafe3.0**: a) Efeito elástico do nível (água à cota do coroamento); b) Efeito da temperatura (arrefecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual); e c) Efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.5 Análise de deslocamentos verticais medidos por nivelamento

Neste ponto o programa **DamSafe3.0** é utilizado para analisar as histórias de deslocamentos verticais medidos por nivelamento no período de 1980 a 2016.

Neste caso considera-se o seguinte modelo de separação de efeitos:

- Efeito elástico do nível (EEN) representado por uma curva definida por uma função exponencial do tipo $a(e^{h/20} - 1)$ em que o parâmetro a é previamente fixado para se ajustar à curva calculada pelo MEF;
- Efeito elástico da temperatura (EET) representado por uma curva harmónica:
$$b_1 \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}}{365,25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}}{365,25}\right);$$
- Efeito de fluência do nível (fluência associada à pressão hidrostática) simulado com base na aplicação de coeficientes de fluência à resposta elástica correspondente à história do nível discretizada mensalmente em patamares constantes, e admitindo para o betão uma lei de fluência de Bazant e Panula com $E_0 = 41,5 \text{ GPa}$, $\varphi_1 = 1,6$, $\beta = 0,05$, $m = 0,33$, $n = 0,22$ (correspondente a um betão moderadamente deteriorado devido a expansões);
- Efeito de fluência associado ao peso próprio estimado com base na aplicação de coeficientes de fluência aos deslocamentos elásticos calculados pelo MEF para a ação do peso próprio;
- Efeito do tempo devido a expansões dado por uma curva do tipo sigmóide dada pela expressão $c \times \left(1 - e^{-t^n/\beta}\right)$, com $\beta = t_{hs}^n \times n/(n-1)$, sendo $n = 3,258$ e $t_{hs}^n = 8000$ dias.

Como referido atrás os resultados do MSE são comparados com os do MEF, em termos de linhas de influência e em termos de deformadas globais. Na Figura 5.21 mostram-se os resultados dos deslocamentos verticais para todos os pontos de nivelamento analisados e as respetivas deformadas globais para o efeito elástico do nível, o efeito da temperatura e o efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.5.1 Ponto no meio da abóbada central, à cota 123,5 m: ponto N12

O ponto N12 situa-se a meio da abóbada central à cota de 123,5 m, como se pode ver na Figura 5.16 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É notório o ótimo ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento

vertical para baixo com um valor máximo da ordem de 4,5 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para baixo no inverno (-5 mm) e para cima no verão (+5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um razoável ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um relativo aumento do deslocamento para baixo ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 6,5 mm para baixo.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos verticais para cima, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 9 mm entre 1980 e 2016.

5.5.2 Ponto no contraforte direito, à cota 123,5 m: ponto N14

O ponto N14 situa-se no contraforte direito à cota de 123,5 m, como se pode ver na Figura 5.17 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É notório o ótimo ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento vertical para baixo com um valor máximo da ordem de 1 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para baixo no inverno (-2,5 mm) e para cima no verão (+2,5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um razoável ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados. A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um relativo aumento do deslocamento para baixo ao longo do tempo. Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um ligeiro andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 2 mm para baixo.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos verticais para cima, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 6,5 mm entre 1980 e 2016.

5.5.3 Ponto no contraforte esquerdo, à cota 123,5 m: ponto N10

O ponto N10 situa-se no contraforte esquerdo à cota de 123,5 m, como se pode ver na Figura 5.18 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o ótimo ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento vertical para baixo com um valor máximo da ordem de 1 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para baixo no inverno (-2,5 mm) e para cima no verão (+2,5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um bom ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um relativo aumento do deslocamento para baixo ao longo do tempo, tal como no ponto anterior N14.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha ligeiramente a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 2 mm para baixo.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos verticais para cima, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 7 mm entre 1980 e 2016.

5.5.4 Ponto no meio da abóbada direita, à cota 123,5 m: ponto N16

O ponto N16 situa-se a meio da abóbada direita à cota de 123,5 m, como se pode ver na Figura 5.19 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É notório o ótimo ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento vertical para baixo com um valor máximo da ordem de 2 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para baixo no

inverno (-5 mm) e para cima no verão (+5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido. No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um razoável ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um relativo aumento do deslocamento para baixo ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de -2,5 mm para baixo.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos verticais para cima, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 6 mm entre 1980 e 2016.

5.5.5 Ponto no meio da abóbada esquerda, à cota 123,5 m: ponto N8

O ponto N8 situa-se a meio da abóbada esquerda à cota de 123,5 m, como se pode ver na Figura 5.20 onde se apresentam graficamente os resultados da separação de efeitos. É igualmente notório o ótimo ajuste MSE/MEF obtido no gráfico do efeito elástico do nível e no gráfico do efeito elástico da temperatura. No primeiro, pode-se verificar que à medida que aumenta a cota de água, aumenta o deslocamento vertical para baixo com um valor máximo da ordem de 2 mm para a água à cota máxima; no segundo, referente ao efeito da temperatura, pode-se ver que o deslocamento é, como esperado, para baixo no inverno (-5 mm) e para cima no verão (+5 mm); o efeito da temperatura tem o andamento harmónico atrás referido.

No gráfico da separação de efeitos ao longo do tempo, entre 1980 e 2016, verifica-se que há um razoável ajuste entre o deslocamento obtido pelo MMQ e os valores observados.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do peso próprio tem o andamento esperado: um relativo aumento do deslocamento para baixo ao longo do tempo.

Neste gráfico ao longo do tempo pode-se verificar ainda que a parcela correspondente ao efeito elástico do nível tem um andamento que acompanha a variação da cota de água ao longo do tempo.

A parcela correspondente ao efeito da temperatura ao longo do tempo tem a típica variação harmónica que acompanha aproximadamente as variações anuais da temperatura do ar.

A parcela correspondente ao efeito de fluência do nível mostra, como esperado, uma característica progressão ao longo do tempo com um valor máximo da ordem de 2,5 mm para baixo.

O efeito do tempo associado às expansões envolve deslocamentos verticais para cima, como se pode observar no gráfico, com um valor acumulado máximo da ordem de 7 mm entre 1980 e 2016.

Nivelamento: Resultados do MSE - (N12 Cota 123.5 m)

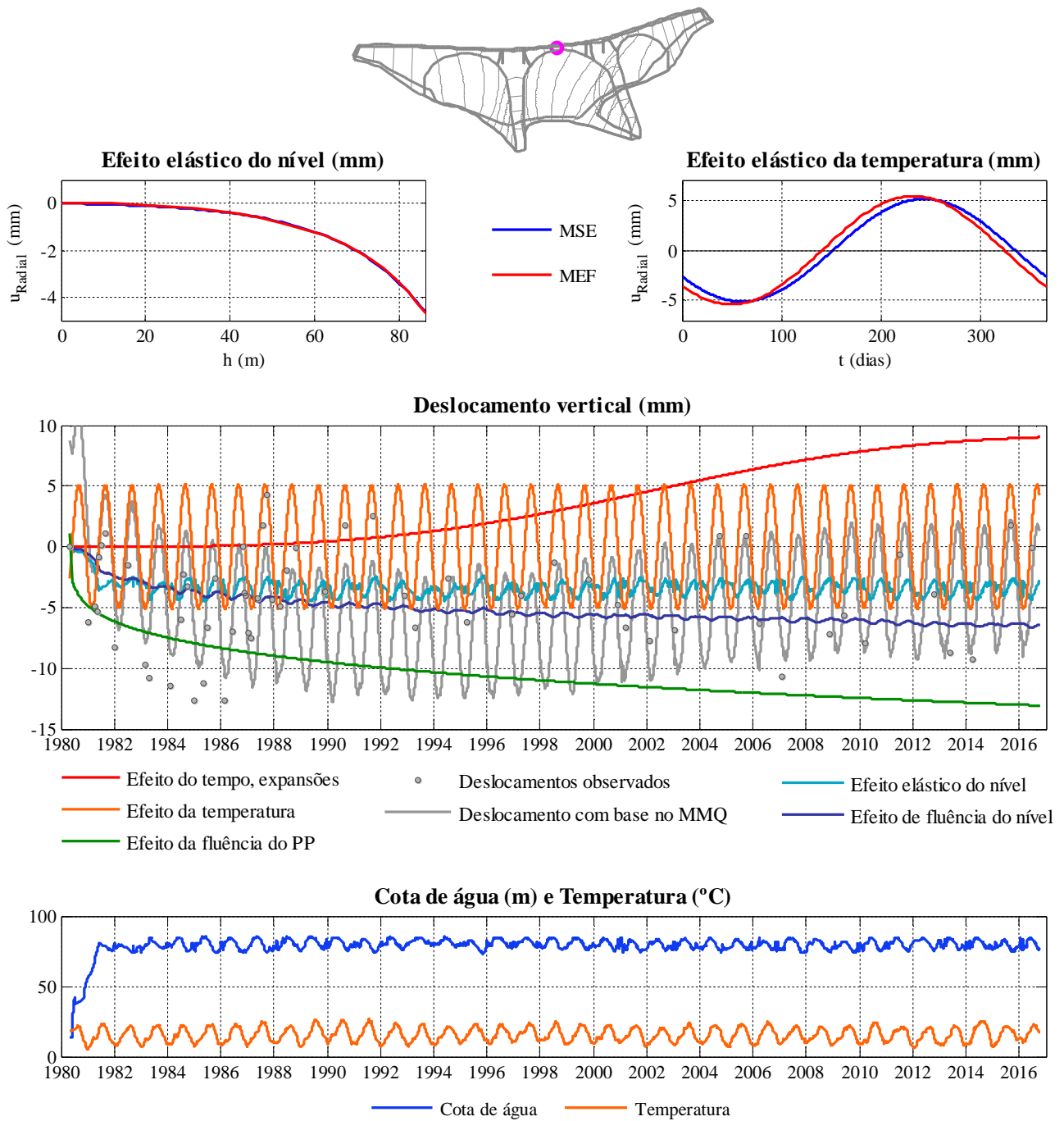


Figura 5.16 - Nivelamento, deslocamento vertical no ponto N12 à cota 123,5 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Nivelamento: Resultados do MSE - (N14 Cota 123.5 m)

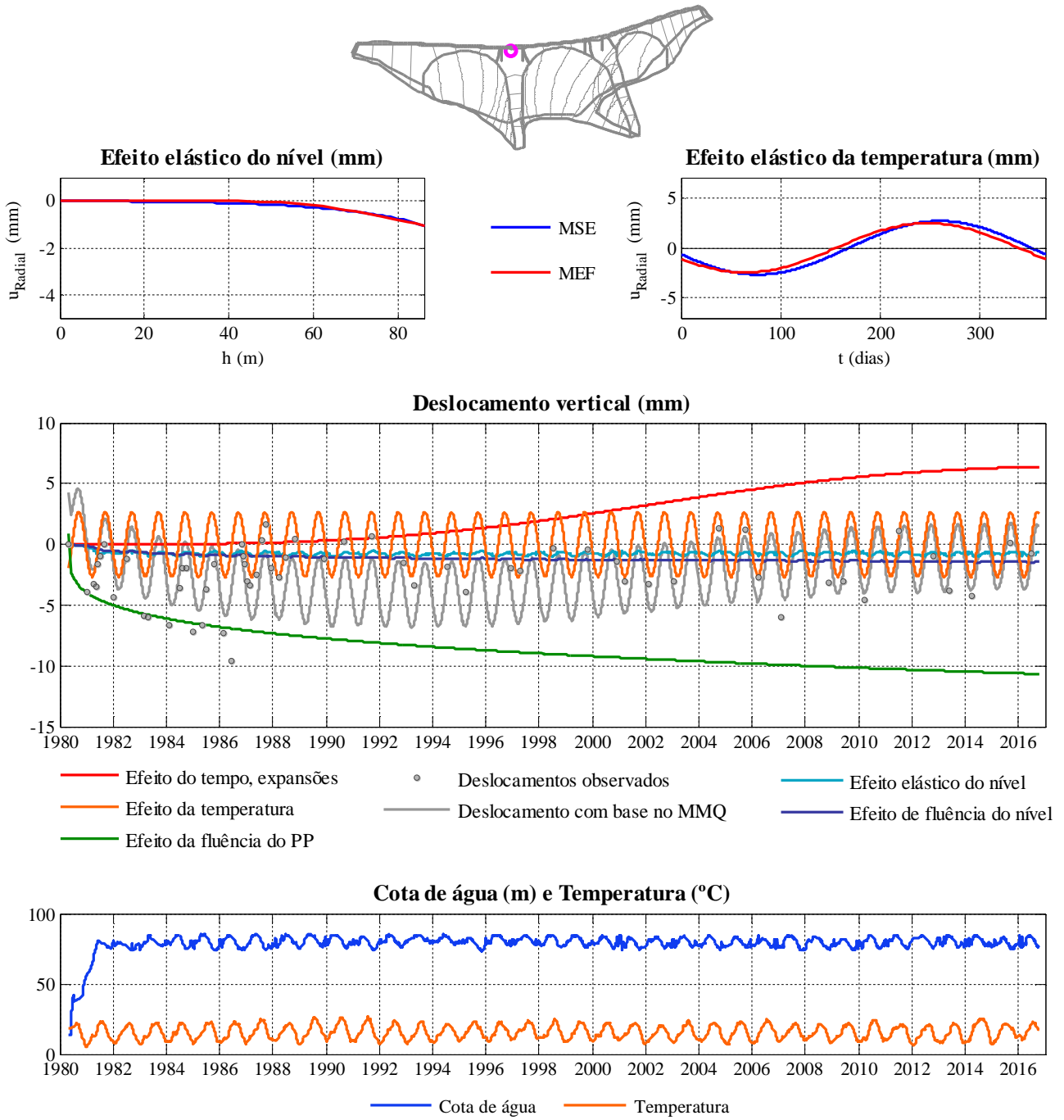


Figura 5.17 - Nivelamento, deslocamento vertical no ponto N14, sobre o contraforte, à cota 123,5 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Nivelamento: Resultados do MSE - (N10 Cota 123.5 m)

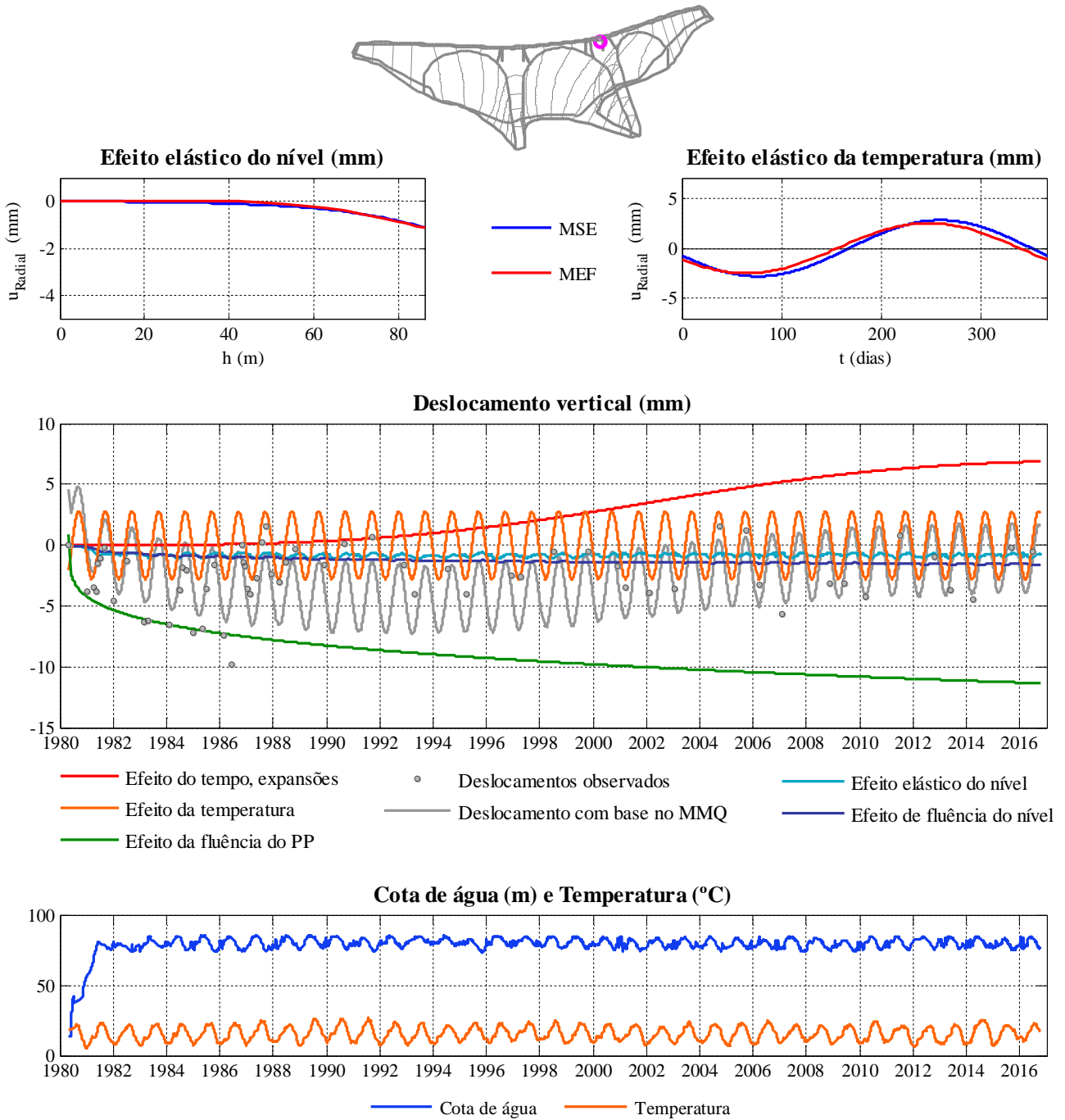


Figura 5.18 - Nivelamento, deslocamento vertical no ponto N10 à cota 123,5 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Nivelamento: Resultados do MSE - (N16 Cota 123.5 m)

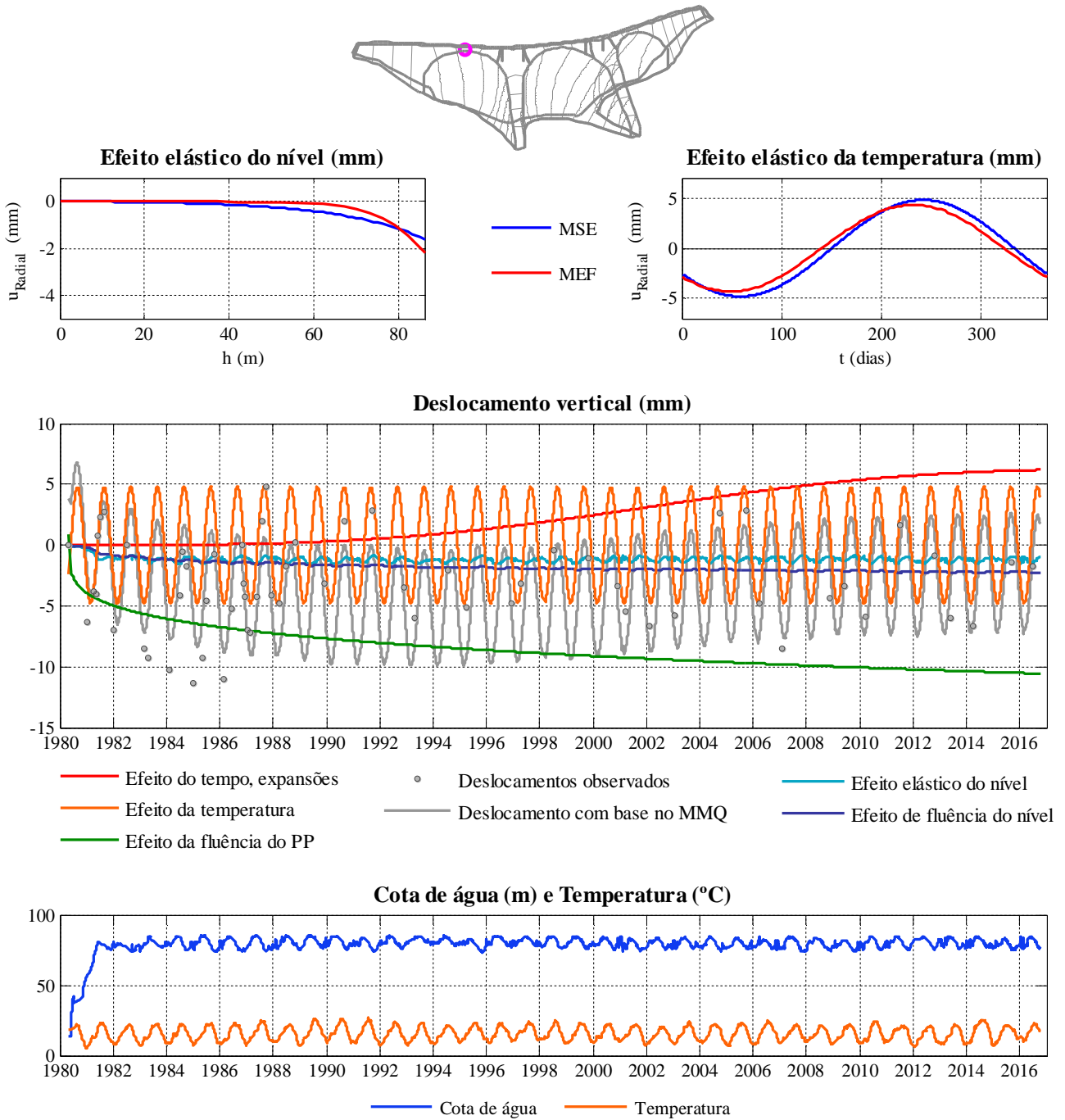


Figura 5.19 - Nivelamento, deslocamento vertical no ponto N16 à cota 123,5 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

Nivelamento: Resultados do MSE - (N8 Cota 123.5 m)

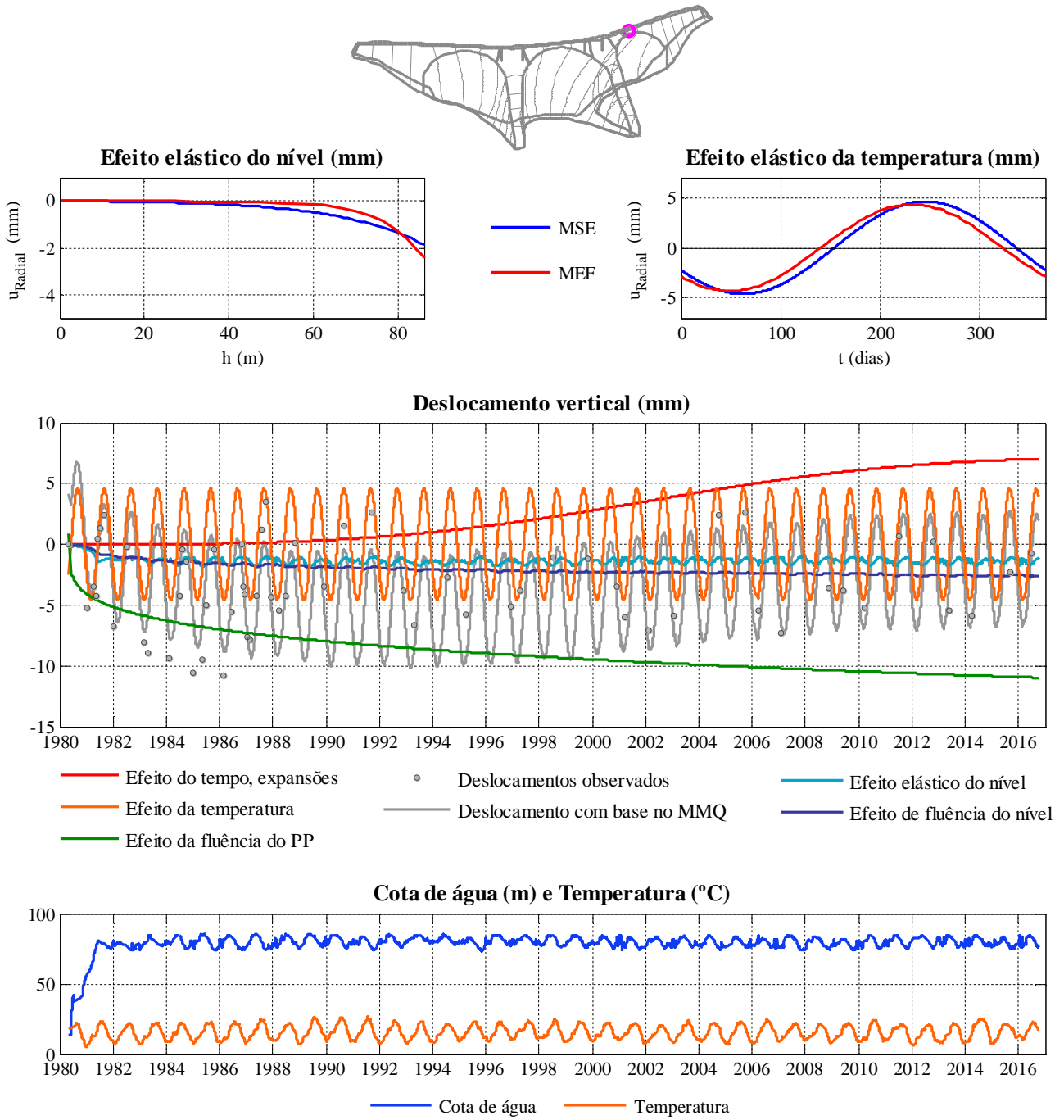


Figura 5.20 - Nivelamento, deslocamento vertical no ponto N8 à cota 123,5 m. Separação de efeitos: resultados MSE/MEF.

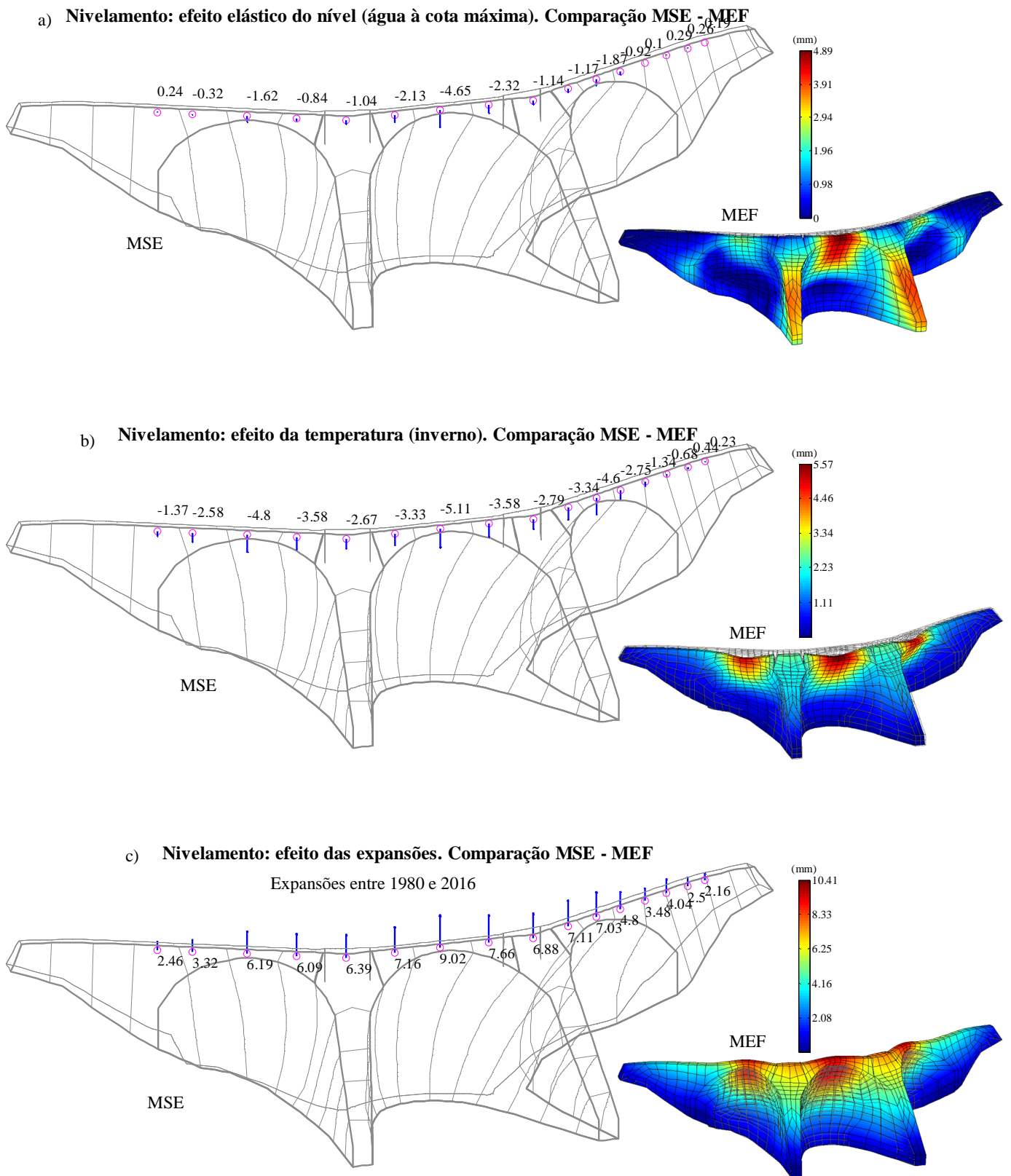


Figura 5.21 - Nivelamento: deslocamentos verticais. Separação de efeitos e comparação de resultados MSE/MEF. Deformadas globais obtidas com o programa **DamSafe3.0**: a) Efeito elástico do nível (água à cota do coroamento); b) Efeito da temperatura (arrefecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual); e c) Efeito das expansões entre 1980 e 2016.

5.6 Comparação de resultados MEF/MSE para cada um dos efeitos

5.6.1 Efeito elástico do nível

Devido ao efeito elástico do nível (à cota máxima de 122 m), o deslocamento da barragem dá-se para jusante como era de esperar, sendo o deslocamento maior na abóbada central e menor nos socos de ambas as margens.

Pode-se observar nos gráficos seguintes, na Figura 5.22, que os valores obtidos pelo MSE estão coerentes com os valores obtidos pelo MEF. Por exemplo, o aparelho C122 (Planimetria), situado no centro da abóbada central, à cota 122 m, com o valor de 20,87 mm de deslocamento, corresponde à cor atribuída no gráfico obtido pelo MEF, que tem um tom encarnado bastante escuro, não sendo o mais escuro de todos, valor esse que é o máximo e que corresponde a 21,23 mm. Olhando para o gráfico da planimetria (geodesia), essa zona central da abóbada central, pode-se ver que ao longo da abóbada os valores vão decrescendo tal como acontece com a variação de cores no gráfico calculado pelo MEF e, passando para o gráfico dos fios de prumo, os mesmos se encontram em concordância com o MEF. Pelos gráficos calculados pelo MSE, através das setas consegue-se perceber que a barragem se desloca para jusante, tanto no gráfico dos aparelhos de geodesia como no gráfico dos fios de prumo e, o gráfico calculado pelo MEF mostra o seu deslocamento também para jusante.

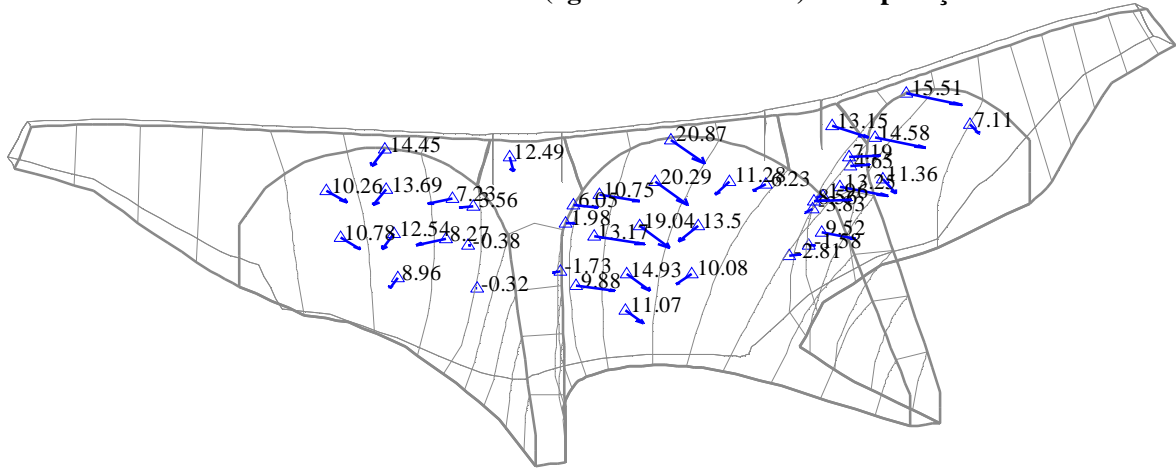
Outro exemplo de que se obteve um ótimo ajuste são os pontos nas abóbadas laterais, que têm valores por volta dos 15 mm de deslocamento, no topo das mesmas, valor esse que está de acordo com as cores correspondentes no gráfico do MEF. Nas abóbadas laterais vê-se também um decréscimo do deslocamento à medida que se vai diminuindo a cota na barragem.

Relativamente aos contrafortes pode-se observar que os valores mais a jusante estão compreendidos entre 3 e 7 mm, tal como no gráfico do campo de deslocamentos do MEF. Nos restantes quatro fios de prumo presentes nos contrafortes, obteve-se valores no topo a rondar os 14 mm tal como no gráfico do MEF e os valores vão decrescendo até aproximadamente 4 mm, que é equivalente ao MSE. Os valores obtidos nos aparelhos presentes no topo dos contrafortes, tanto os de geodesia como os de fios de prumo, têm resultados semelhantes.

Comparando o lado direito e o lado esquerdo da barragem, o deslocamento é o esperado devido às margens terem módulos de elasticidade diferentes. A margem direita tem módulo de elasticidade maior e, portanto, é mais rígida sofrendo assim menores deslocamentos, enquanto que a margem esquerda tem módulo de elasticidade menor e conseqüentemente sofre maiores deslocamentos.

Foram atingidos valores semelhantes relativamente ao efeito elástico do nível, quando comparados os valores entre os gráficos do MSE e o gráfico do MEF dos deslocamentos horizontais.

Planimetria: efeito elástico do nível (água à cota máxima). Comparação MSE - MEF



Fios de Prumo: efeito elástico do nível (água à cota máxima). Comparação MSE - MEF

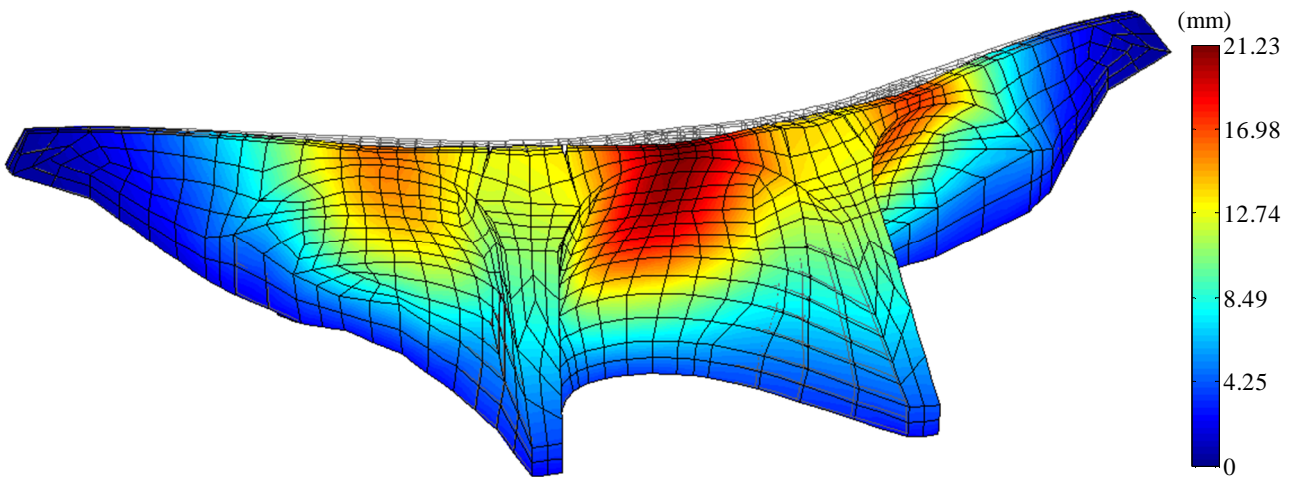
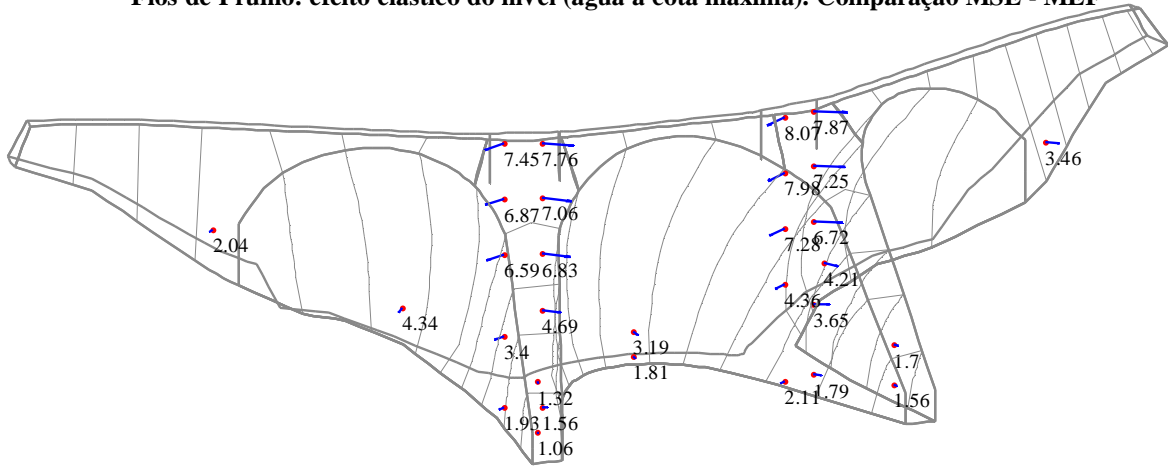


Figura 5.22 - Deslocamento radial associado ao efeito elástico do nível. Comparação entre MSE e MEF.

Os deslocamentos verticais que a barragem sofre por efeito elástico do nível são para baixo, como se pode ver tanto no gráfico dos aparelhos de nivelamento como no gráfico do MEF, da Figura 5.23. Pode-se analisar pelo comprimento das setas que a deformação que a barragem sofre em termos de deslocamentos verticais é a mesma observada no campo de deslocamentos do gráfico do MEF.

No centro da abóbada central no gráfico do MSE tem-se um valor de 4,65 mm para baixo que corresponde à cor atribuída no gráfico do MEF. Conforme aumenta ou diminui o tamanho das setas no gráfico do MSE, o campo de deslocamentos varia as cores em conformidade com o valor obtido. No centro da abóbada esquerda tem-se o valor de 1,87 mm para baixo e no centro da abóbada direita tem-se 1,62 mm para baixo também. Como se pode observar no gráfico do MEF, a tonalidade amarela é mais acentuada na abóbada esquerda do que na abóbada direita, ou seja, o deslocamento é maior na esquerda e menor na direita.

De uma forma geral foram conseguidos bons resultados entre o MSE e o MEF, para os deslocamentos verticais devido ao efeito elástico do nível.

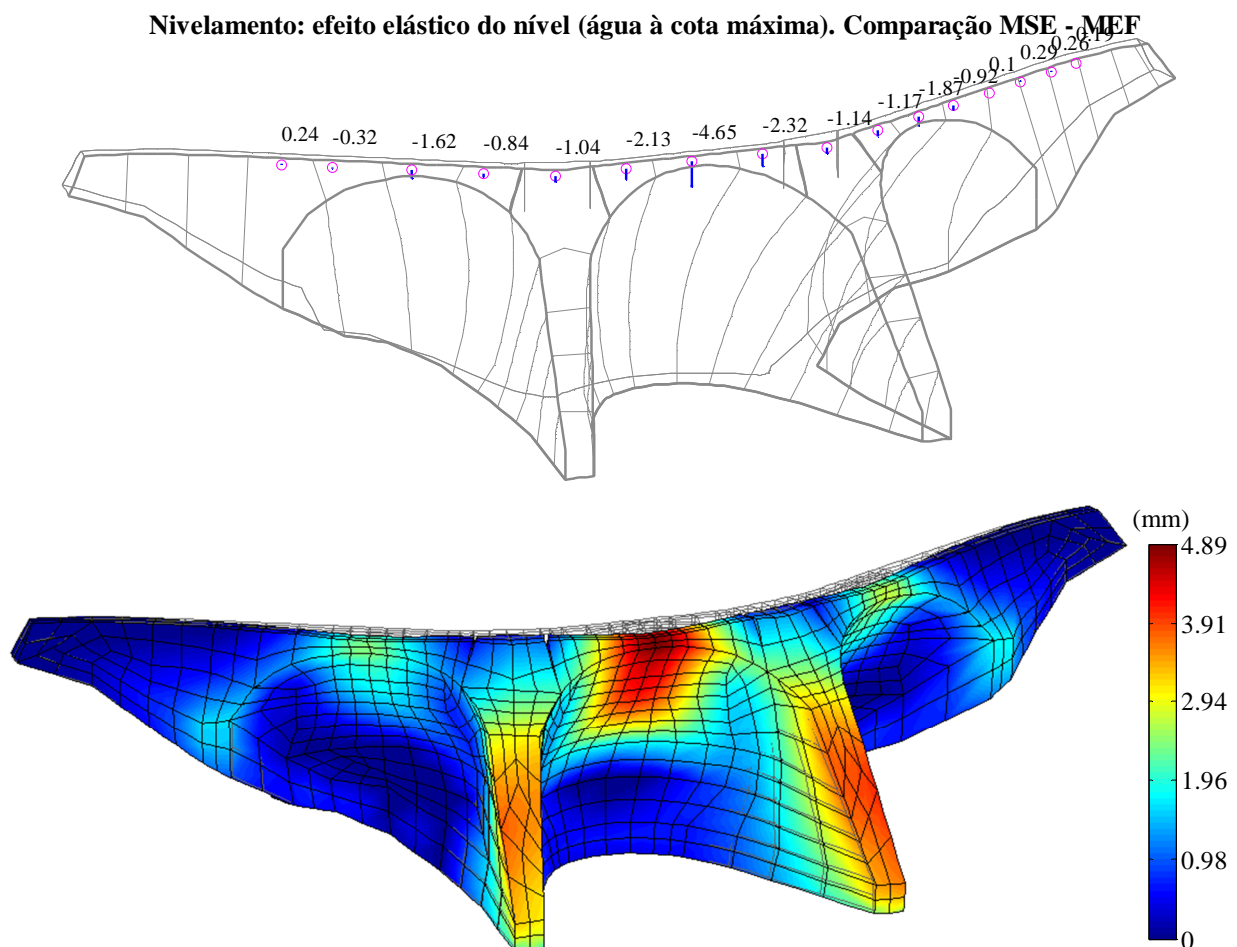


Figura 5.23 - Deslocamento vertical associado ao efeito elástico do nível (Nivelamento). Comparação entre MSE e MEF.

5.6.2 Efeito da temperatura

Relativamente ao efeito da temperatura (Figura 5.24) o deslocamento é também para jusante, uma vez que se trata da época de inverno, caso fosse no verão os deslocamentos na barragem seriam para montante. Comparativamente com o efeito elástico do nível, a temperatura provoca um menor deslocamento da barragem, mas o comportamento da barragem é semelhante ao do efeito elástico do nível, com o deslocamento nos contrafortes a ser inferior ao deslocamento no centro e topo das abóbadas.

No ponto C122, localizado no topo da abóbada central, tem-se um deslocamento de 3,96 mm para jusante que corresponde à cor atribuída no gráfico do MEF para essa mesma zona.

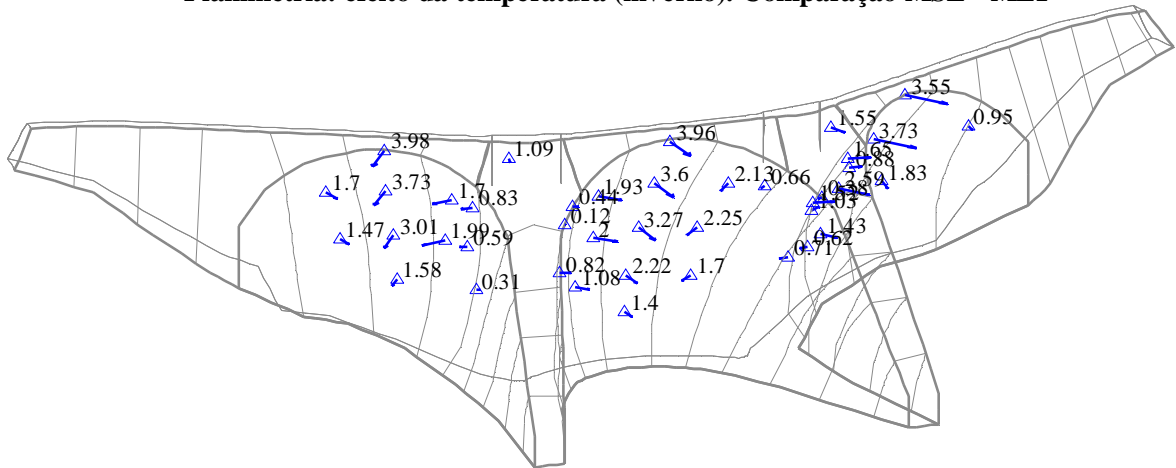
Pode-se verificar que existe também, nesta comparação do efeito da temperatura, um bom acerto de valores entre o MSE e o MEF, com os valores obtidos pelo MSE a corresponderem bem com as cores obtidas pelo MEF. da mesma forma que no efeito elástico do nível, neste efeito o valor do deslocamento obtido através do MSE vai decrescendo com a diminuição da cota dos aparelhos, havendo coerência entre os resultados obtidos na geodesia e nos fios de prumo e comparando-os com o MEF.

Observando as abóbadas laterais estas têm um comportamento contrário ao do efeito elástico do nível, ou seja, apesar de ser ligeira a diferença, existem maiores deslocamentos na abóbada direita. No entanto, nos contrafortes o mesmo não acontece, os deslocamentos são maiores no contraforte esquerdo e menores no contraforte direito. Este comportamento deve-se ao facto de o efeito da temperatura estar associado à exposição solar. No topo das abóbadas laterais tem-se 3,55 mm e 3,98 mm, à esquerda e à direita, respetivamente. O deslocamento vai diminuindo ao longo das abóbadas e também dos contrafortes, uma vez que o efeito da temperatura é maior à superfície do que em profundidade. Pode-se ver que comparando valores de fios de prumo colocados nos contraforte do lado de montante e outros do lado de jusante, há um maior deslocamento do lado de jusante, devido precisamente ao facto do lado de jusante ter mais contacto com a exposição solar e o lado a montante como está coberto pela albufeira já não ser tão afetado.

No gráfico do MEF consegue-se observar o comportamento da barragem e confirmar a semelhança entre os valores observados do MSE. A zona com maiores deslocamentos é o topo das abóbadas, sendo a abóbada central a que tem mais deslocamentos, seguida da abóbada esquerda, mas com uma diferença muito pequena para a abóbada direita. A zona mais a jusante dos contrafortes é a que apresenta maiores deslocamentos, logo a seguir às abóbadas tal como nos gráficos do MSE.

Tal como no efeito elástico do nível, os resultados obtidos entre os dois métodos são bastante idênticos.

Planimetria: efeito da temperatura (inverno). Comparação MSE - MEF



Fios de Prumo: efeito da temperatura (inverno). Comparação MSE - MEF

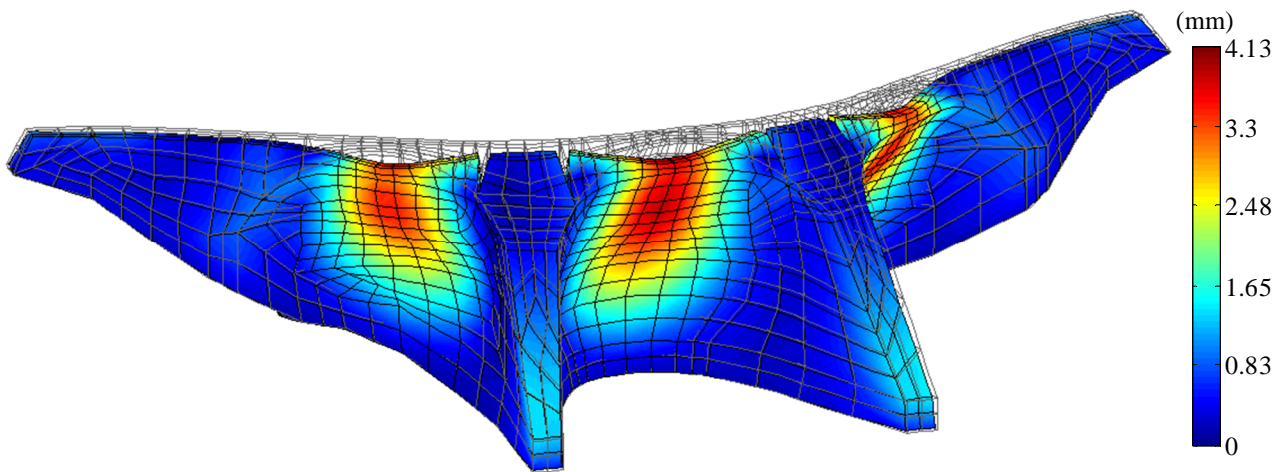
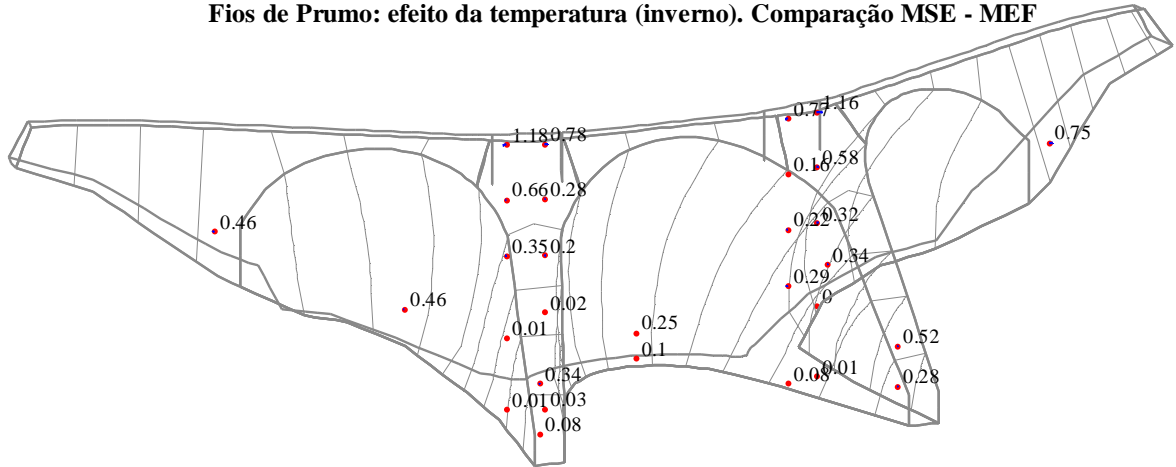


Figura 5.24 - Deslocamento radial associado ao efeito da temperatura. Comparação entre MSE e MEF.

Por o efeito da temperatura ser definido na época de inverno, os deslocamentos que a barragem sofre são negativos, caso se tivesse escolhido a época de verão os deslocamentos seriam positivos. Pode-se ver pelo o tamanho das setas que o comportamento da barragem é semelhante ao efeito elástico do nível, com deslocamentos maiores no centro das abóbadas e menores tanto nos contrafortes como de lado.

No meio da abóbada central tem-se um deslocamento de 5,11 mm para baixo que corresponde à cor no campo de deslocamentos do gráfico do MEF e nas abóbadas laterais tem-se 4,6 mm à esquerda e 4,8 mm à direita, ambos também para baixo e em concordância com o gráfico do MEF.

No contraforte esquerdo tem-se o valor do deslocamento de 2,79 mm negativos e no contraforte direito 2,67 mm também negativos, que se encontram de acordo com a tonalidade verde presente em ambos os contrafortes, em que essa cor corresponde a valores entre 2,23 mm e 3,34 mm.

No gráfico do campo de deslocamentos pode-se observar que o tom azul vai de claro para escuro das abóbadas para as margens, tal como o tamanho das setas indica no gráfico dos nivelamentos.

Os resultados entre o MSE e o MEF também foram bem conseguidos nos deslocamentos verticais associados ao efeito da temperatura no inverno, como se mostra na Figura 5.25.

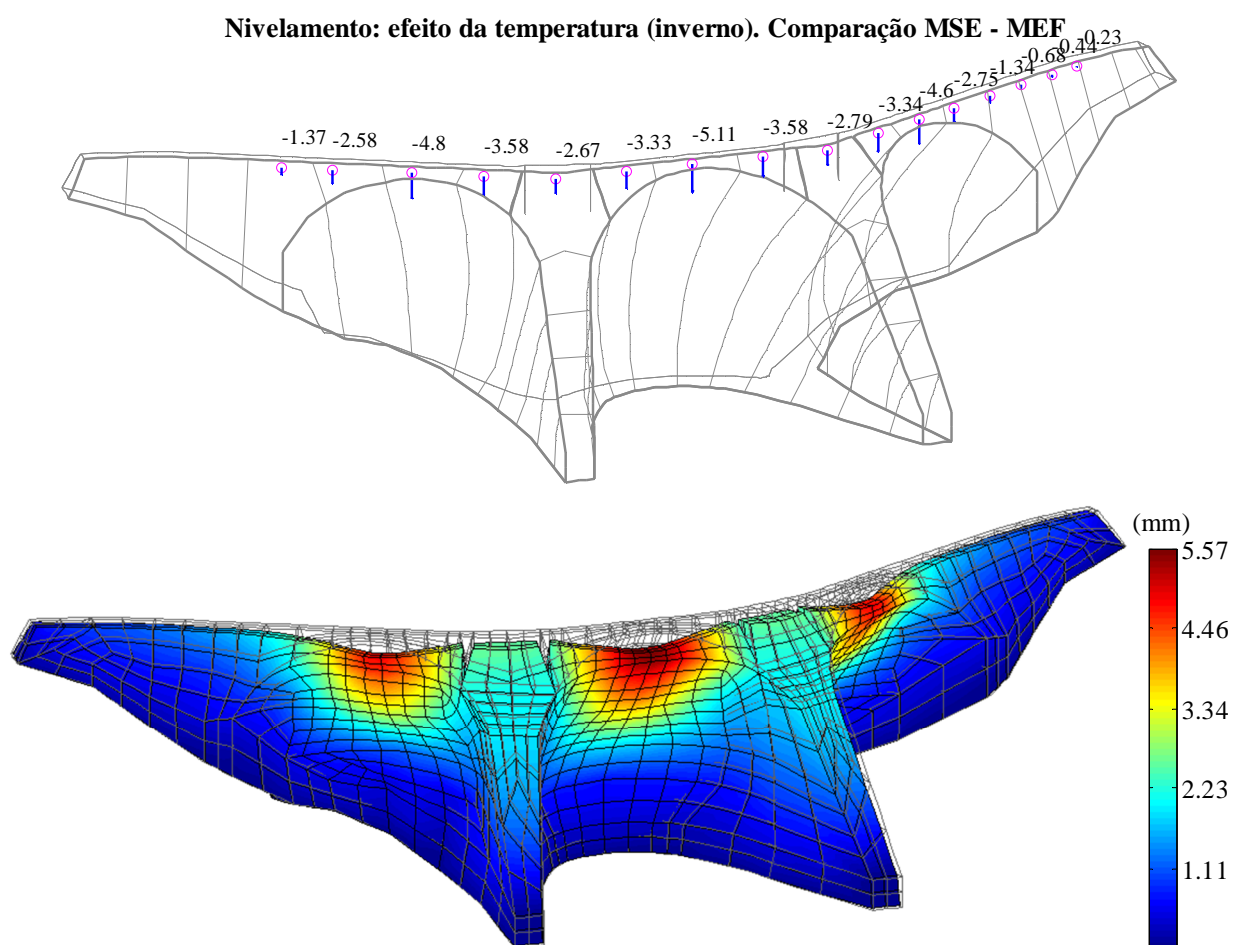


Figura 5.25 - Deslocamento vertical associado ao efeito da temperatura (Nivelamento). Comparação entre MSE e MEF

5.6.3 Efeitos das expansões

O efeito das expansões já não provoca na barragem os mesmos deslocamentos que os efeitos anteriores. Neste caso surgem deslocamentos horizontais para montante e para jusante, contudo como são maiores os deslocamentos para montante, à primeira vista parece que o deslocamento da barragem de uma forma geral se desloca toda para montante.

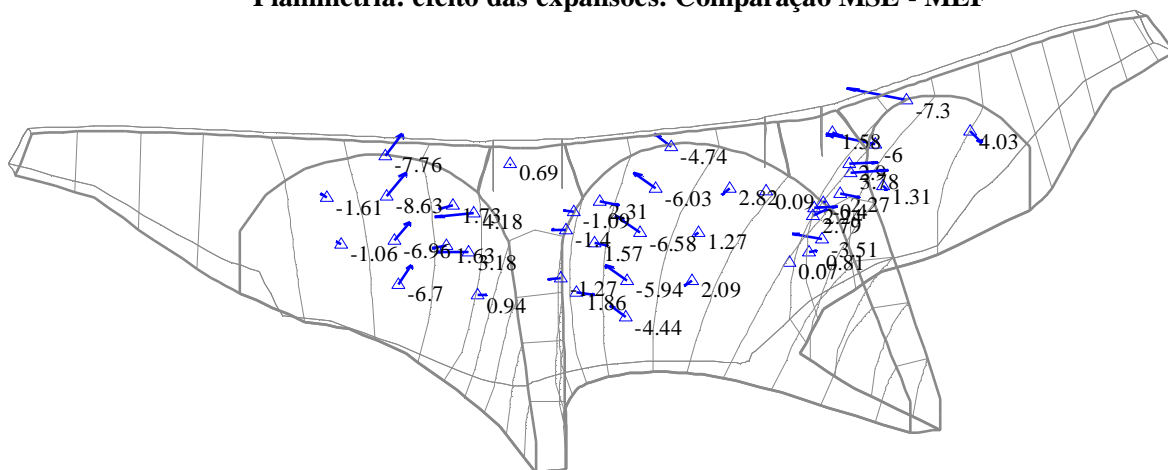
Na Figura 5.26 estão então representados os resultados da observação feita pelos aparelhos de geodesia e fios de prumo e os resultados calculados pelo MEF. Comparando os resultados dos aparelhos de geodesia pode-se observar que as zonas com maiores deslocamentos são as zonas centrais de cada abóbada, sendo o valor nas abóbadas laterais maiores do que na abóbada central. Nas abóbadas laterais tem-se valores aproximadamente de 7 a 8 mm e na abóbada central valores aproximadamente entre 5 e 6 mm, com o máximo a ser atingido na zona central, a uma cota média, de cada abóbada. Estes deslocamentos nos centros das abóbadas têm deslocamentos para montante enquanto que os outros aparelhos apresentam deslocamentos para jusante mas com valores inferiores, sendo atingidos os valores maiores junto aos contrafortes nas abóbadas laterais.

Nos fios de prumo tem-se um valor máximo de 4,22 mm localizado na abóbada esquerda perto da fundação, na abóbada central tem-se também um valor alto de 4,16 mm. Nos contrafortes registaram-se valores até 3,19 mm no contraforte direito, no entanto não existe qualquer organização dos valores registados, ou seja, ao longo dos contrafortes os valores vão aumentando e diminuindo, mas sempre para montante.

No gráfico definido com base no MEF é possível observar uma boa correlação nos resultados entre os dois métodos, com os valores máximos a surgirem nas zonas centrais das abóbadas e a provocarem deslocamentos para montante. Apesar de não haver registos nas zonas superiores mais a jusante dos contrafortes, existe uma tonalidade esverdeada que indica valores aproximados dos 3 mm.

Pode-se então constatar que existem expansões em bastantes zonas da barragem da Aguieira que, provocam deslocamentos horizontais com uma incidência muito maior no centro de cada abóbada.

Planimetria: efeito das expansões. Comparação MSE - MEF



Fios de Prumo: efeito das expansões. Comparação MSE - MEF

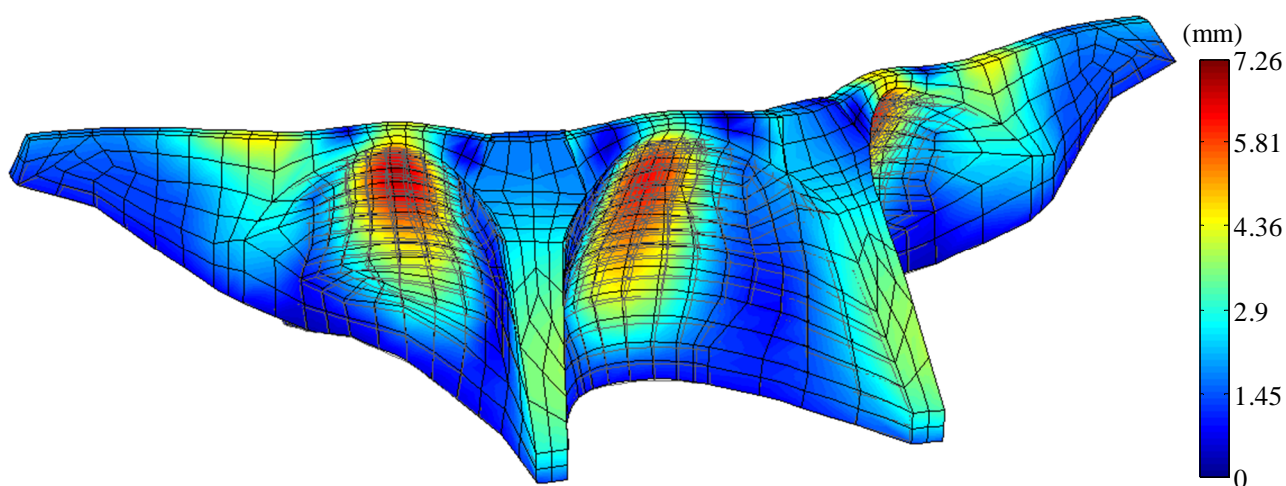
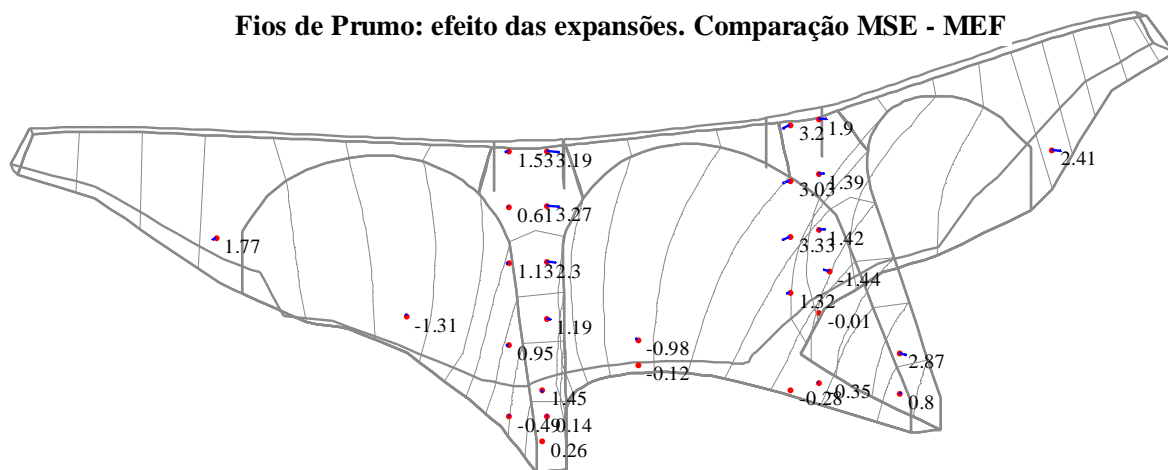


Figura 5.26 - Deslocamento radial associado às expansões. Comparação entre MSE e MEF.

Relativamente aos deslocamentos verticais provocados pelo efeito das expansões, medidos por nivelamento, estes são para cima conforme se pode ver na Figura 5.27, ao contrário do efeito que tanto o nível da água ou a temperatura no inverno provocam.

Tem-se assim, no gráfico dos valores registados através de nivelamento, um deslocamento máximo de 9,02 mm no centro da barragem que vai diminuindo à medida que se aproxima dos contrafortes. No contraforte esquerdo tem-se um valor de 6,88 mm e no direito de 6,39 mm, voltando a subir até ao ponto central da abóbada esquerda com o valor de 7,03 mm e diminui ligeiramente na abóbada direita com o valor de 6,19 mm. A partir do centro das abóbadas laterais os valores decrescem até aproximadamente 2 mm.

Comparando com o gráfico de deslocamentos calculado pelo MEF, pode-se ver pelas tonalidades que o comportamento é o mesmo. Nas zonas centrais das abóbadas foi atribuída a cor encarnada a laranja escura, no topo dos contrafortes tem um laranja mais claro e à medida que se vai afastando das abóbadas vai se variando do amarelo para o azul escuro com a diminuição dos deslocamentos verticais provocados pelo efeito das expansões. Através da legenda é possível ver que as cores correspondem aos valores apresentados pelo gráfico do MSE.

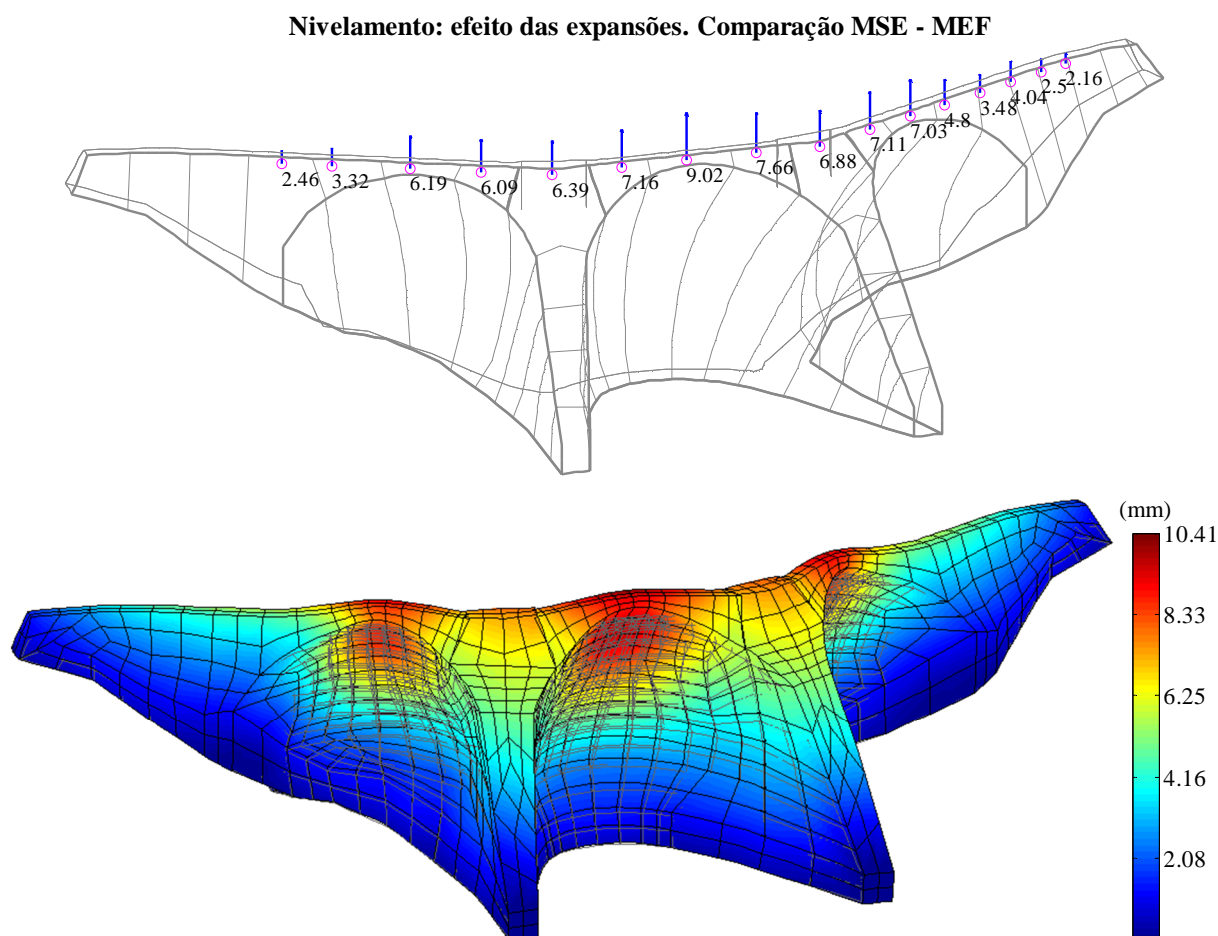


Figura 5.27 - Deslocamento vertical associado às expansões (Nivelamento). Comparação entre MSE e MEF.

5.7 Considerações finais

Neste capítulo foi analisado o comportamento estrutural da barragem da Aguieira com base nos módulos MEF e MSE do programa **DamSafe3.0**, desenvolvido em MATLAB.

Apresentaram-se resultados referentes à análise dos deslocamentos observados pelo método dos fios de prumo e por métodos geodésicos: planimetria e nivelamento.

Os resultados obtidos permitiram concluir que, adotando modelos de separação de efeitos baseados numa função de fluência correspondente a um betão afetado por um processo expansivo, ou seja admitindo uma fluência de cerca do dobro da inicialmente prevista (com base em ensaios, realizados em 1980, sobre provetes de betão crivado intacto), obtém-se um excelente acordo entre os deslocamentos observados (analisados por separação de efeitos) e os deslocamentos calculados numericamente com o módulo MEF do **DamSafe3.0**, nomeadamente no que se refere à parcela das expansões acumuladas entre 1980 e 2016 a qual foi estimada numericamente com base no programa **Expand2014** utilizando campos térmicos e higrométricos no corpo da barragem calculados com o MEF recorrendo ao programa **PAT2.0**. É de salientar que a referida boa concordância foi conseguida em termos das componentes radiais e verticais dos deslocamentos porque no módulo MSE do DamSafe3.0 foi introduzida a possibilidade considerar a parcela de fluência associada ao peso próprio, ou seja, foi considerada uma separação dos efeitos em três parcelas: i) fluência associada ao peso próprio; ii) fluência associada à pressão hidrostática; e iii) parcela associada ao desenvolvimento das expansões no betão ao longo do tempo.

6

Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Síntese do trabalho e apreciação dos resultados

O controlo da segurança de barragens baseia-se na monitorização da resposta das obras ao longo do tempo e na comparação entre resultados observados e resultados previstos através de modelos numéricos. Em geral os resultados observados analisam-se com base em modelos de separação de efeitos, o que facilita a comparação com resultados de modelos numéricos de elementos finitos.

Os resultados apresentados nesta dissertação permitiram contribuir para o desenvolvimento das metodologias de análise do comportamento de barragens de betão em fase de exploração normal, em particular de barragens abóbada com problemas de expansões. No âmbito deste trabalho foi possível contribuir para o melhoramento do programa **DamSafe3.0** o qual tem vindo a ser desenvolvido no LNEC-DBB, em MATLAB, para apoio à análise dos dados da observação de barragens recorrendo à utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos. O programa **DamSafe3.0**, foi estruturado por forma a incluir um módulo de análise estrutural com elementos finitos (MEF) e um módulo para análise dos resultados observados por separação de efeitos (MSE). No âmbito deste trabalho foi especialmente melhorada a componente do programa para análise gráfica dos resultados nomeadamente para comparação entre resultados de MEF e de MSE.

Como exemplo de aplicação considerou-se o caso da barragem da Aguieira, uma barragem de três abóbadas, com cerca de 90 m de altura, cujo primeiro enchimento ocorreu em 1980.

O comportamento da barragem ao longo do tempo foi analisado na perspectiva de caracterizar o efeito estrutural da expansão do betão, que foi identificada na última década.

Os deslocamentos observados com fios de prumo e por métodos geodésicos (planimetria e nivelamento), nas três abóbadas e nos contrafortes, foram analisados com base em modelos de separação de efeitos desenvolvidos especificamente no âmbito desta dissertação e incluídos no

módulo MSE do programa **DamSafe3.0**. Estes modelos de separação de efeitos foram preparados para recorrer a informação proveniente de modelos de elementos finitos com vista a permitirem separar os efeitos do tempo em várias parcelas, nomeadamente, em duas parcelas de fluência (o programa permite considerar diferentes coeficientes de fluência da lei de Bazant e Panula, adaptadas a betões com ou sem dano), uma associada à pressão hidrostática e outra ao peso próprio, e numa parcela associada a expansões. Utilizaram-se funções exponenciais para simular o efeito elástico do nível da água e funções do tipo sigmóide para simular a evolução das expansões ao longo do tempo. A parcela da temperatura é simulada com base em temperaturas observadas. As diferentes parcelas obtidas por separação de efeitos, nos vários pontos observados, foram comparadas com as correspondentes parcelas determinadas numericamente com o MEF, em termos de linhas de influência e de deformadas globais, com especial ênfase na parcela correspondente ao efeito das expansões em termos de deslocamentos verticais e horizontais.

Os resultados obtidos no caso da barragem da Aguieira permitiram concluir que, adotando MSE baseados numa função de fluência correspondente a um betão afetado por um processo expansivo, ou seja admitindo uma fluência de cerca do dobro da inicialmente prevista (com base em ensaios, realizados em 1980, sobre provetes de betão crivado intacto), obtém-se um excelente acordo entre os deslocamentos observados (analisados por separação de efeitos) e os deslocamentos calculados numericamente com o módulo MEF do **DamSafe3.0**, nomeadamente no que se refere à parcela das expansões acumuladas entre 1980 e 2016 a qual foi estimada numericamente com base no programa **Expand2014** utilizando campos térmicos e higrométricos no corpo da barragem calculados com o MEF recorrendo ao programa **PAT2.0**. É de salientar que o referido bom acordo foi conseguido em termos das componentes radiais e verticais dos deslocamentos porque no módulo MSE do **DamSafe3.0** foi introduzida a possibilidade considerar a parcela de fluência associada ao peso próprio, ou seja, foi considerada uma separação dos efeitos em três parcelas: i) fluência associada ao peso próprio; ii) fluência associada à pressão hidrostática; e iii) parcela associada ao desenvolvimento das expansões ao longo do tempo.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Futuramente considera-se que será de todo o interesse desenvolver uma interface gráfica interativa para o programa **DamSafe3.0**, que facilite a utilização do programa, nomeadamente, que possibilite uma rápida comparação entre resultados de vários tipos de modelos de separação de efeitos e resultados de modelos de elementos finitos com diferentes tipos de calibração.

Poderá ser interessante a análise do comportamento da barragem da Agueira com a incorporação de juntas no cálculo estrutural da barragem e a comparação com o comportamento sem juntas.

O estudo do comportamento da barragem da Agueira, e de outras também, com problemas de reações expansivas, sugere que é conveniente desenvolver estudos sobre a eventual relação entre o desenvolvimento de reações expansivas e a alteração das propriedades viscoelásticas do betão, o que pode ser fundamental na análise do comportamento das obras ao longo do tempo.

Bibliografia

- Bazant, Z. P., & Panula, L. (1979). *"Practical prediction of time dependent deformations of concrete"*. *Mat&Struct*. V12 N° 69.
- Brum, H. (2015). *BARRAGEM DA AGUIEIRA. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em abril de 2014*. LNEC, NOTA TÉCNICA 129/2015 – DBB/NO. Lisboa: LNEC. Obtido em setembro de 2015
- Castro, A. T. (1998). *"Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão"*. *Tese de doutoramento (elaborada no LNEC)*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- CNPGB. (1992). Obtido em 2017, de http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Lista.htm: http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Lista.htm
- Espada, M. I. (2010). *Desenvolvimento de modelos para análise dinâmica de estruturas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxiliares*. *Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Esposito, R. et al. (2016). *Influence of the Alkali-Silica Reaction on the Mechanical*. *Journal of Materials in Civil Engineers*.
- Gomes, J. M., & Pina, C. A. (2000). *BARRAGEM DA AGUIEIRA. Ensaio de vibração forçada*. LNEC, Relatório 348/00 - NDE/NEE. Lisboa: LNEC.
- Gomes, J. P. (2007). *"Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas"*. *Tese de doutoramento*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gomes, S. (1981). *"Automatização das atividades de observação de barragens e análise quantitativa de resultados"*. *Tese para especialista e acesso a investigador auxiliar*. LNEC, Lisboa.
- ICOLD. (2017). Obtido em 2017, de International Commission on Large Dams: <http://www.icold-cigb.net/>
- Itasca. (2016). *Itasca International Inc*. Obtido em 2016, de <https://www.itscainternational.com/>
- Jensens. (2017). *ECivil*. Obtido em 2017, de <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-estacao-total.html>
- JOGOFO (Ed.). (2015). *Filmagens aéreas sobre Mortágua*. Mortágua. Obtido em 2017, de www.videoaudiopro.pt
- Leitão, N. (2012). *Análise Térmica de barragens de Betão - Acções térmicas ambientais*. Lisboa: LNEC, Relatório 185/2012-DBB/NMMF.
- LNEC. (1974). *"Estudo das fundações da barragem da Aguieira"*. *Estudo realizado para a EDP (antiga Companhia Portuguesa da Eletricidade)*. LNEC, Lisboa.

- Mata, J. (2007). Aplicação de redes neuronais ao controlo de segurança de barragens de betão. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mata, J. (2013). "*Structural safety control of concrete dams aided by automated monitoring systems*". Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mendes, E. (2014). Observação e controlo da segurança estrutural de barragens de betão. Utilização integrada de modelos numéricos e de modelos de separação de efeitos. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Mora Ramos. (1985). "*Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens*". Tese de Especialista. LNEC, Lisboa.
- Morais, V., & Vieira, C. (2013). *MATLAB. Curso Completo*. Lisboa: FCA - Editora de Informática, Lda.
- Oliveira, S. (2000). *Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano*. Tese de doutoramento. LNEC, Lisboa: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oliveira, S. (2016). Folhas de apoio da Unidade Curricular de Modelação Estrutural com Elementos Finitos. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Oliveira, S.; Espada, M. (2013). *Modelação Computacional em MATLAB. Dos Fundamentos às Aplicações (2º Curso de MATLAB), Folhas de apoio*. LNEC, Lisboa.
- Portela A. & Silva A. (1996). *Mecânica dos Materiais*. Lisboa: Plátano-Edições Técnicas.
- Rocha, M., Serafim, L., & Silveira, A. (1958). "*A method of quantitative interpretation of the results obtained in the observation of dams*". 6º congresso de grandes barragens da ICOLD, R.83 Q.21. Memória nº 128 (LNEC). Nova Iorque, EUA.
- Salazar, F. (2017). A machine learning based methodology for anomaly detection in dam behavior. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Souza, N. L. (2017). *educação*. Obtido em 2017, de <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/mecanica/grandezas-escalares-e-vetoriais.html>
- Torres, J. (2010). *Métodos de observação durante a execução de obras subterrâneas*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Willm, G., & Beaujoint, N. (1967). "*Les méthodes de surveillance des barrages au service de la Production Hydraulique d'Electricité de France*". Problèmes anciens e solutions nouvelles. IX Congresso da ICOLD, R.30, Q.34. Istambul.
- Zienkiewicz, O. C. (1967). "*The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*". Ed. McGraw-Hill.