



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



**OBSERVAÇÃO E CONTROLO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL
DE BARRAGENS DE BETÃO
UTILIZAÇÃO INTEGRADA DE MODELOS NUMÉRICOS E
DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS**

EMANUEL JESUS GUERREIRO MENDES
Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação de natureza científica elaborada no âmbito do protocolo de cooperação entre o ISEL e o LNEC para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadores:

Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira (LNEC/ISEL)
Doutor António Luís Henriques Tavares de Castro (LNEC/ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado (ISEL)

Vogais:

Mestre Margarida Isabel Ramalho Espada (LNEC)
Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira (LNEC/ISEL)

Novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Dou graças a Deus e dedico este meu trabalho, com todo o meu carinho e orgulho, principalmente ao meu irmão Miguel Ângelo, aos meus pais Maria das Dores e Gabriel Fernando e à minha avó Antónia, por todo o sacrifício, paciência, apoio e motivação, não só ao longo de toda a minha formação académica, onde nunca nada me faltou, como também no resto do princípio de toda a minha vida (sim, isto ainda é só o princípio!).

Seria igualmente impossível alcançar o sucesso académico sem reconhecer o mérito que todos os meus colegas, amigos e docentes do ISEL tiveram ao me acompanharem nesta pequena jornada de emoções, alegrias e vivências que me preencheram e que, com orgulho, experienciei enquanto aluno do ISEL, especialmente ao André Henriques, cheio do seu companheirismo, amizade e fraternidade, sobretudo durante a nossa licenciatura.

Não podia faltar reconhecer e agradecer ainda a oportunidade e privilégio de ter podido trabalhar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, sendo para mim um grande orgulho estagiar em tamanha instituição de dimensão internacional, permitindo-me ter sido orientado por alguém com tão grande generosidade, profissionalismo e ao mesmo tempo simpatia, como o é o engenheiro Sérgio Oliveira, que incansável e incessantemente esteve presente e me potenciou esta vontade de querer desenvolver este trabalho, que durante todo o estágio me fez crescer em sabedoria e aprender engenharia, sempre me acrescentando motivação e interesse pelo estudo desenvolvido, juntamente com o engenheiro António Tavares de Castro que sempre que necessário, esteve disponível para dar apoio no acesso aos dados do **GestBarragens**, ao brilhante André Silvestre, o constante apoio e orientação, a quem devo o sincero agradecimento nesta minha interessantíssima experiência, assim como aos colegas do Departamento de Barragens de Betão, André Osório, Diogo Rebelo, Patrícia Salvado, Renato Pereira e Nuno Azevedo.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.

Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos,

no mínimo fará coisas admiráveis.



José de Alencar¹

[1829-1877]

¹ José de Alencar foi um jornalista, político, advogado, orador, crítico, cronista, polemista, romancista e dramaturgo brasileiro.

OBSERVAÇÃO E CONTROLO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO. UTILIZAÇÃO INTEGRADA DE MODELOS NUMÉRICOS E DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS

Resumo

Atualmente, o controlo da segurança estrutural de barragens de betão em fase de exploração tende a apoiar-se em sistemas de monitorização que permitem a recolha automática e a recolha manual dos dados da observação. Estes dados são armazenados computacionalmente em bases que podem ser acedidas via *web* através de sistemas informáticos (*web systems*) especificamente desenvolvidos para apoiar as atividades de gestão e controlo da segurança. Estes sistemas informáticos são parte integrante dos sistemas de monitorização de barragens e devem: i) ser dotados de interfaces gráficas que permitam uma grande interatividade; ii) permitir armazenar e consultar os dados da observação sob a forma numérica; iii) permitir a visualização gráfica das diversas grandezas observadas ao longo do tempo. Devem também disponibilizar módulos para: i) analisar a evolução ao longo do tempo das grandezas observadas com base em modelos de separação de efeitos (MSE); ii) utilizar modelos de elementos finitos (MEF) para simular o comportamento observado, sob a ação das principais solicitações; e iii) comparar as observações e os resultados dos MSE e MEF. Neste sentido, há que investir no desenvolvimento de *software* que facilite a utilização integrada de modelos de separação de efeitos (MSE) e de modelos numéricos de elementos finitos (MEF), uma vez que o controlo da segurança estrutural de grandes barragens se baseia essencialmente na comparação entre a resposta observada (analisada com base em MSE) e a resposta prevista com base em MEF.

No âmbito desta dissertação, foi desenvolvido em MATLAB, o programa **DamSafe1.0**, o qual facilita a utilização integrada de MSE e de MEF. Para mostrar as diversas potencialidades do **DamSafe1.0** e o interesse da sua utilização no controlo da segurança estrutural de barragens mostram-se resultados de aplicação ao caso da barragem da Aguieira. Com este exemplo de aplicação é possível salientar alguns dos aspetos inovadores introduzidos no **DamSafe1.0**, nomeadamente ao nível dos MSE: i) possibilidade de separação dos efeitos do tempo numa parcela viscoelástica devida ao efeito do nível e numa parcela associada aos restantes efeitos do tempo (no caso da barragem da Aguieira, envolve os efeitos associados às expansões); e ii) consideração de funções exponenciais na representação do efeito do nível.

Palavras-Chave

Barragens de betão, Modelos de separação de efeitos, Modelos de elementos finitos, Comportamento observado ao longo do tempo

MONITORING AND STRUCTURAL SAFETY CONTROL OF CONCRETE DAMS. INTEGRATED USE OF NUMERICAL MODELS AND MODELS FOR EFFECTS SEPARATION

Abstract

Nowadays, the safety control of concrete dams under normal operation tends to rely on monitoring systems that provide automated and manual data collection. These data are computationally stored in data bases that can be accessed via web by web systems, specifically developed to support the activities of management and safety control. These web systems are a fundamental component of monitoring systems and should: i) be provided with graphical interfaces with good interactivity; ii) allow storing and querying observation data in numerical form; iii) allow graphical visualization of the observed data over time. These web systems should also include computational modules: i) to analyze the evolution over time of the observed magnitudes based on models of separation effects (MSE) ; ii) for using finite element models (FEM) to simulate the observed behavior under the action of the main loads; and iii) to compare the observations and the results of MSE and FEM. From this view, it is needed to invest in the development of software to facilitate the integrated use of models for separating effects (MSE) and numerical finite element models (FEM) , since the structural safety control of large dams is essentially based on comparison between the observed response (analyzed based on MSE) and the predicted response based on FEM.

Within this dissertation, it is developed in MATLAB, the **DamSafe1.0** program, which facilitates the integrated use of MSE and FEM. To show the different capabilities of **DamSafe1.0** and the interest of its use in controlling the structural safety of dams are shown results of application to the case of Aguieira dam. With this application example is possible to highlight some of the innovative aspects introduced in **DamSafe1.0**, particularly in terms of MSE: i) the possibility of separating the effects of time in a viscoelastic part due to the water level effect and a part related to other time effects (in the case of Aguieira dam involves the swelling effects); and ii) consideration of exponential functions in the representation of the water level effect.

Keywords

Concrete dams, Models for effects separation, Finite element models, Observed behavior over time

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações gerais.....	1
1.2	Justificação e enquadramento.....	3
1.3	Objetivos da Dissertação	6
1.4	Estruturação do trabalho	9
2	MODELOS UTILIZADOS NO CONTROLO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS	11
2.1	Generalidades.....	11
2.2	Modelos Numéricos de Elementos Finitos	14
2.2.1	Mecânica dos Sólidos. Formulação do problema.....	14
2.2.2	Estado de tensão e de deformação num ponto do interior duma estrutura	15
2.2.3	Equações Fundamentais da Mecânica dos Sólidos	16
2.2.3.1	Relação deformação-deslocamento – Equação de compatibilidade	17
2.2.3.2	Relação Tensões-Deformações – Equação constitutiva.....	18
2.2.3.3	Relação entre tensões e forças mássicas – Equação de equilíbrio	19
2.2.4	Equação de Navier	20
2.2.5	Forma fraca da equação de Navier	21
2.2.6	Fundamentos do Método dos Elementos Finitos.....	22
2.2.7	Elemento finito 3D utilizado no programa DamSafe1.0	26
2.3	Modelos de separação de efeitos	27
2.3.1	Fundamentos	27
2.3.1.1	Efeito elástico do nível da água: $u_H(h)$	29
2.3.1.2	Efeito térmico: $u_T(\bar{t})$	31
2.3.1.3	Efeitos do tempo: $u_t(t)$	32
2.3.1.4	Termo independente: k	34
2.3.2	Cálculo dos parâmetros do modelo pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)	34

2.3.3	Modelos com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática ..	37
2.3.4	Vantagens da utilização de modelos com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática	39
2.4	Considerações finais	42
3	DAMSAFE1.0. PROGRAMA EM MATLAB PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO	43
3.1	Considerações iniciais	43
3.2	Apresentação do <i>software</i> DamSafe1.0 (MATLAB)	44
3.2.1	Painel “Início”	44
3.2.2	Painel “Dados Gerais”	45
3.2.3	Menu “Interpretação Quantitativa”	47
3.2.4	Painel “Resultados (IQ)”	48
3.2.5	Painel “Modelo EF3D”	49
3.3	Considerações finais	55
4	UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA DAMSAFE1.0 NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DA AGUIEIRA	57
4.1	Considerações iniciais	57
4.2	A barragem da Aguieira	59
4.2.1	Estrutura	59
4.2.2	Fundação	59
4.2.3	Principais ações. Regime de exploração da albufeira e temperatura do ar	62
4.2.4	Composição do betão e caracterização do comportamento viscoelástico.....	63
4.2.5	Alterações químicas no betão. Caracterização do processo expansivo.....	65
4.3	Barragem da Aguieira. Análise dos deslocamentos observados.....	67
4.3.1	Deslocamentos horizontais observados por geodesia (planimetria)	67
4.3.1.1	Deslocamento radial no ponto 8 (a meio da abóbada central, à cota 122 m)	68
4.3.1.2	Deslocamento tangencial no ponto 8 (a meio da abóbada central, à cota 122 m)	71
4.3.1.3	Deslocamento radial nos pontos 6 e 10 (a meio da abóbadas laterais, à cota 122 m)	71
4.3.1.4	Deslocamento radial nos pontos 7 e 9, no topo dos contrafortes (à cota 122 m)	74

4.3.2	Deslocamentos horizontais observados com fios de prumo	78
4.3.2.1	Deslocamentos radiais nos pontos 17, 23, 29 e 35, no topo dos contrafortes (cota 123,8 m) .	79
4.3.3	Deslocamentos verticais observados por nivelamento	86
4.3.3.1	Deslocamento vertical nos pontos 8, 10, 12, 14 e 16, no coroamento (à cota 123,5 m)	87
4.4	Considerações finais.....	96
5	CONCLUSÃO	97
5.1	Síntese do trabalho.....	97
5.2	Apreciação dos resultados obtidos.....	98
5.3	Desenvolvimentos futuros	99
6	BIBLIOGRAFIA.....	101

Índice de figuras

Figura 1.1 – Controlo da segurança de barragens de betão. Aparelhagem de observação (Oliveira S. , 2000).

Figura 1.2 – Utilização integrada de modelos de separação de efeitos e modelos elementos finitos.

Figura 1.3 – Programação em MATLAB/GUIDE. Plataforma GUIDE para desenvolvimento de projetos com interfaces gráficas, editor do MATLAB e exemplo de uma figura gerada pelo MATLAB.

Figura 1.4 – GUIDE: Interface gráfica. Painel “Início”, “Dados Gerais”, “Interpretação Quantitativa”, “Resultados IQ” e “Modelo EF3D”.

Figura 2.1 – Modelos utilizados no controlo de segurança de barragens de betão em fase de exploração.

Figura 2.2 – Mecânica dos sólidos. Estabelecimento do problema para o caso geral tridimensional.

Figura 2.3 – Ponto interior de um sólido: a. Estado de tensão; b. Estado de deformação.

Figura 2.4 – Incógnitas num problema de Mecânica dos Sólidos.

Figura 2.5 – Relação entre deformações e deslocamentos.

Figura 2.6 – Relação tensões-deformações. Matriz de elasticidade para materiais isotrópicos.

Figura 2.7 – Relações tensões-forças mássicas. Equação de equilíbrio.

Figura 2.8 – Equações fundamentais da Mecânica dos Sólidos. Formulação em deslocamentos: equação de Navier.

Figura 2.9 – Discretização de um cabo em quatro EF e representação de uma solução aproximada dada pela combinação linear de funções simples definidas por troços lineares (funções de interpolação $N_i(x)$) (Oliveira & Espada, 2013).

Figura 2.10 – Funções de interpolação definidas por elemento: a. Elemento finito de barra com dois pontos nodais e um grau de liberdade de translação por nó; b. Elemento finito de placa com quatro pontos nodais e dois graus de liberdade de translação por nó.

Figura 2.11 – Discretização de uma estrutura em elementos finitos tridimensionais. a. Introdução da aproximação fundamental do MEF na forma fraca da equação de Navier. b. Obtenção da equação de equilíbrio de um elemento finito (Oliveira & Espada, 2013).

Figura 2.12 – Elemento finito utilizado no programa DamSafe1.0. Elemento isoparamétrico de segundo grau, com 20 pontos nodais (Oliveira S. , 2000).

Figura 2.13 – A atuação simultânea de várias ações origina uma resposta global cuja interpretação requer a utilização de modelos que permitam quantificar separadamente os vários efeitos.

Figura 2.14 – Curvas representativas do efeito elástico do nível usando expressões do tipo $u_H(h) = a(e^{h/c_f} - 1)$. Comparação para três valores distintos do coeficiente de forma: $c_f = 15$ (vermelho), $c_f = 12.22$ (verde) e $c_f = 8.75$ (azul).

Figura 2.15 – Comparação de curvas representativas do efeito elástico do nível usando uma expressão polinomial da forma $u_H(h) = a h^3$ a preto, e uma expressão do tipo $u_H(h) = a(e^{h/15} - 1)$ a vermelho.

- Figura 2.16 – Curva do tipo sigmóide, representativa do efeito do tempo usando uma expressão da forma $u_i(t) = c \left(1 - e^{-t^n/\beta} \right)$.
- Figura 2.17 – Modelo de separação de efeitos aplicado à análise do deslocamento radial observado por geodesia no fecho da abóbada direita, ao nível do coroamento, da barragem da Aguieira (DamSafe1.0).
- Figura 2.18 – Discretização do nível da albufeira em patamares como é exigido pela formulação de modelos de interpretação quantitativa, com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática.
- Figura 2.19 – Análise (MSE) do deslocamento radial do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada sujeita a um processo expansivo. Nota: para barragens de abóbadas múltiplas com contrafortes os deslocamentos ao longo do tempo devidos à expansão podem ser para jusante.
- Figura 2.20 – Interpretação quantitativa do deslocamento vertical do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada em que não existem reações expansivas.
- Figura 2.21 – Interpretação quantitativa do deslocamento vertical do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada em que existem reações expansivas.
- Figura 2.22 – Utilização integrada de resultados da observação (em cima à esquerda), modelos numéricos de elementos finitos (em baixo, à esquerda) e de modelos de interpretação quantitativa (formulação).
- Figura 3.1 – Painel de entrada do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.
- Figura 3.2 – Painel "Dados Gerais" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.
- Figura 3.3 – Painel "Interpretação Quantitativa" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.
- Figura 3.4 – Painel "Resultados (IQ)" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.
- Figura 3.5 – Menu "Modelo EF3D" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.
- Figura 3.6 – Campo de deslocamentos, devido à pressão hidrostática (cota 126 m).
- Figura 3.7 – Campo de deslocamentos, devido a um aquecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual.
- Figura 3.8 – Campo de deslocamentos, devido ao peso próprio.
- Figura 3.9 – Campo de deslocamentos, devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio.
- Figura 3.10 – Campo de tensões, devido à pressão hidrostática (cota 126 m).
- Figura 3.11 – Campo de tensões, devido a um aquecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual.
- Figura 3.12 – Campo de tensões, devido ao peso próprio.
- Figura 3.13 – Campo de tensões, devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio.
- Figura 4.1 – Barragem da Aguieira: a. Localização; b. Planta, alçado de jusante e corte transversal.

Figura 4.2 - Discretização da barragem e da fundação em elementos finitos tridimensionais isoparamétricos com 20 pontos nodais. Zonamento da fundação de acordo com as características de deformabilidade identificadas através de ensaios *in-situ* (LNEC, 1974).

Figura 4.3 – Evolução das principais ações ao longo do tempo. Níveis de água e temperatura do ar.

Figura 4.4 – 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 modelo de elementos finitos (valor médio para o betão integral).

Figura 4.5 – Curvas estimadas a partir de ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado da barragem da Aguieira: a. Funções de fluência; b. Coeficientes de fluência relativos às funções de fluência

Figura 4.6 – Evolução ao longo do tempo das extensões em quatro extensómetros corretores. O aumento das extensões indicia a ocorrência de reações expansivas da ordem de $\epsilon_{exp} = 3,5 \times 10^{-6}$ /ano, nos corretores dos grupos G37 e G38, e $\epsilon_{exp} = 7 \times 10^{-6}$ /ano nos corretores dos grupos G31 e G32.

Figura 4.7 – Evolução ao longo do tempo dos deslocamentos verticais em dois extensómetros de varas (verticais) instalados nos encontros. O aumento dos deslocamentos verticais indicia a ocorrência de reações expansivas da ordem de $\epsilon_{exp} = 1 \times 10^{-6}$ /ano, no encontro da margem direita, e $\epsilon_{exp} = 4,5 \times 10^{-6}$ /ano, no encontro da margem esquerda.

Figura 4.8 – Marcas geodésicas.

Figura 4.9 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, a meio da abóbada central. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos versus Modelo de Elementos Finitos).

Figura 4.10 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, a meio da abóbada direita. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

Figura 4.11 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, a meio da abóbada esquerda. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

Figura 4.12 – Geodesia: deslocamento radial no topo do contraforte direito, à cota 122 m. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

Figura 4.13 – Geodesia: deslocamento radial no topo do contraforte esquerdo, à cota 122 m. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

Figura 4.14 – Deslocamentos radiais medidos por geodesia nos pontos à cota 122 m. Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

Figura 4.15 – Fios de prumo invertidos. Localização em planta e em alçado, com indicação das bases de leitura.

Figura 4.16 – Fios de prumo: Deslocamento radial do ponto 17.

Figura 4.17 – Fios de prumo: deslocamento radial no ponto 23.

Figura 4.18 – Fios de prumo: Deslocamentos radiais do ponto 29.

Figura 4.19 – Fios de prumo: Deslocamentos radiais do ponto 35.

Figura 4.20 – Deslocamentos radiais medidos por fios de prumo nos pontos à cota 123,8 m. Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

Figura 4.21 – Planta e alçado longitudinal jusante das marcas de nivelamento, no coroamento.

Figura 4.22 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 12.

Figura 4.23 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 8.

Figura 4.24 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 10.

Figura 4.25 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 14.

Figura 4.26 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 16.

Figura 4.27 – Deslocamentos verticais medidos por nivelamento nos pontos à cota 123,5 m. Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

Figura 4.28 – Resultados dos modelos de separação de efeitos aplicados à análise dos deslocamentos radiais (geodesia e fio de prumo) e verticais (nivelamento de precisão).

1

Introdução

1.1 Considerações gerais

Muitas das grandes barragens de betão atualmente em serviço foram construídas há mais de quatro ou cinco décadas. Em geral são obras de elevado risco potencial que apresentam, em maior ou menor grau, sinais de deterioração. Contudo, é geralmente reconhecido que é de todo o interesse prolongar ao máximo a vida útil destas obras que, assim, deverá ultrapassar em largos anos a duração estimada na fase de projeto. Neste sentido tem-se assistido a um progressivo aumento das exigências de segurança regulamentares, induzido pelas crescentes preocupações da sociedade e pela evolução dos conhecimentos técnico-científicos relativos a este tipo de obras.

Dado que todas as obras em exploração, desde as mais modernas às mais antigas, devem respeitar as presentes exigências de segurança regulamentares, verifica-se que é cada vez mais importante a utilização de modernas técnicas de monitorização e o desenvolvimento de *software* adequado para apoio à interpretação e previsão do comportamento de sistemas barragem-fundação-albufeira, com vista à verificação das crescentes exigências de segurança. O 34º artigo do Regulamento de Segurança de Barragens (DL 344/2007) refere que as regras de exploração da barragem devem respeitar a segurança estrutural, ambiental e hidráulico-operacional. No entanto, será realçada apenas a segurança estrutural, única pertencente ao domínio deste trabalho.

As grandes barragens de betão são instrumentadas com diversos tipos de aparelhos que se destinam à observação em contínuo do seu comportamento, o que é fundamental para o respetivo controlo de segurança. Em fase de serviço, o controlo da segurança estrutural envolve, entre outras, as seguintes atividades:

- inspeção visual, o que permite a deteção de sinais de comportamento anómalo, particularmente em aspetos ou zonas da obra que não sejam ou não possam ser instrumentadas;
- leitura da aparelhagem de observação instalada (Figura 1.1) manual ou automaticamente;
- validação e armazenamento em suporte informático das leituras efetuadas na aparelhagem;
- análise da história das várias grandezas observadas com vista à interpretação do comportamento global das obras utilizando modelos de interpretação quantitativa (Rocha, Serafim, & Silveira, 1958), também designados por modelos de separação de efeitos, baseados em hipóteses semi-empíricas e em técnicas estatísticas de minimização de erros que permitam separar efeitos (note-se que em situações que envolvam comportamentos não-lineares a separação de efeitos não é fisicamente admissível);
- análise do comportamento global das obras recorrendo a *software* que permita a utilização integrada de modelos numéricos de elementos finitos (MEF) e de modelos estatísticos para a interpretação quantitativa das observações.

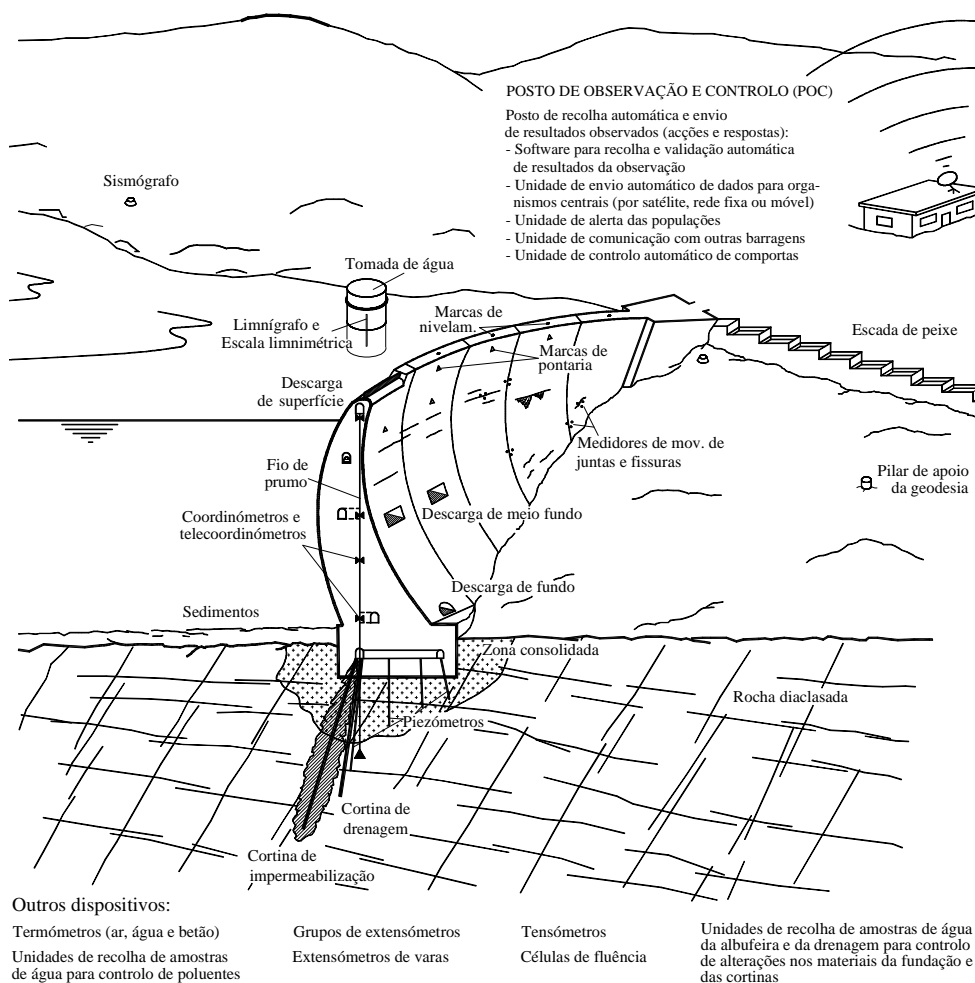


Figura 1.1 – Controlo da segurança de barragens de betão. Aparelhagem de observação (Oliveira S. , 2000).

Nesta dissertação salienta-se a crescente importância da utilização de *software* baseado em modelos fiáveis para interpretação e previsão do comportamento de grandes barragens de betão, nomeadamente modelos de separação de efeitos e modelos numéricos de EF.

1.2 Justificação e enquadramento

Atualmente o controlo da segurança estrutural de grandes barragens de betão em fase de exploração, tende a apoiar-se em sistemas de monitorização que permitem a recolha automática e a recolha manual dos dados da observação. Estes dados são armazenados computacionalmente em bases de dados que podem ser acedidas via *web* através de sistemas informáticos (*web systems*) especificamente desenvolvidos para apoiar as atividades de gestão e controlo da segurança das obras. Em Portugal existe o sistema **GestBarragens**², desenvolvido no âmbito de uma parceria envolvendo o LNEC (parceiro promotor), o INESC-ID (parceiro tecnológico) e a EDP (parceiro utilizador).

O desenvolvimento deste tipo de sistemas informáticos tem sido orientado na perspetiva de aproveitar a constante evolução dos meios computacionais, não apenas em termos de *hardware*, com cada vez maior capacidade/velocidade de cálculo e transmissão de dados via *web*, mas também em termos do *software* para apoio à programação de aplicações computacionais com interfaces gráficas sofisticadas. Como exemplo de *software* de apoio à programação, refira-se o GUIDE (*Graphical User Interface Design Environment*) (MathWorks, 2014) do MATLAB (MATrix LABoratory) (MathWorks, 2011), utilizado no âmbito desta dissertação, o VisualStudio da Microsoft (VBasic.net, VisualC++), ou o OutSystems (expressamente vocacionado para o desenvolvimento de *web applications*).

A tendência atual é encarar os sistemas informáticos como parte integrante dos sistemas de monitorização de barragens, a par dos equipamentos instalados em obra para efetuar as medições das diversas grandezas da observação. Estes sistemas informáticos devem ser dotados de adequadas interfaces gráficas que permitam uma grande interatividade, e, para além de permitirem armazenar e consultar os dados da observação sob a forma numérica, devem também permitir a respetiva visualização sob a forma gráfica e possibilitar, em simultâneo, a comparação

² O GestBarragens é um sistema de informação *online* (*web system*) dedicado ao controlo de segurança de barragens, com base de dados e conjunto de aplicações que permitem arquivar, validar e representar numérica e graficamente os dados e resultados da observação das obras. Foi desenvolvido no âmbito de um projeto financiado pelo PRIME (Programa de Incentivos à Modernização da Economia), em parceria com o LNEC, o INESC-ID e a EDP.

de diversas grandezas e a escolha de diferentes conjuntos de grandezas para visualização gráfica da sua evolução ao longo do tempo.

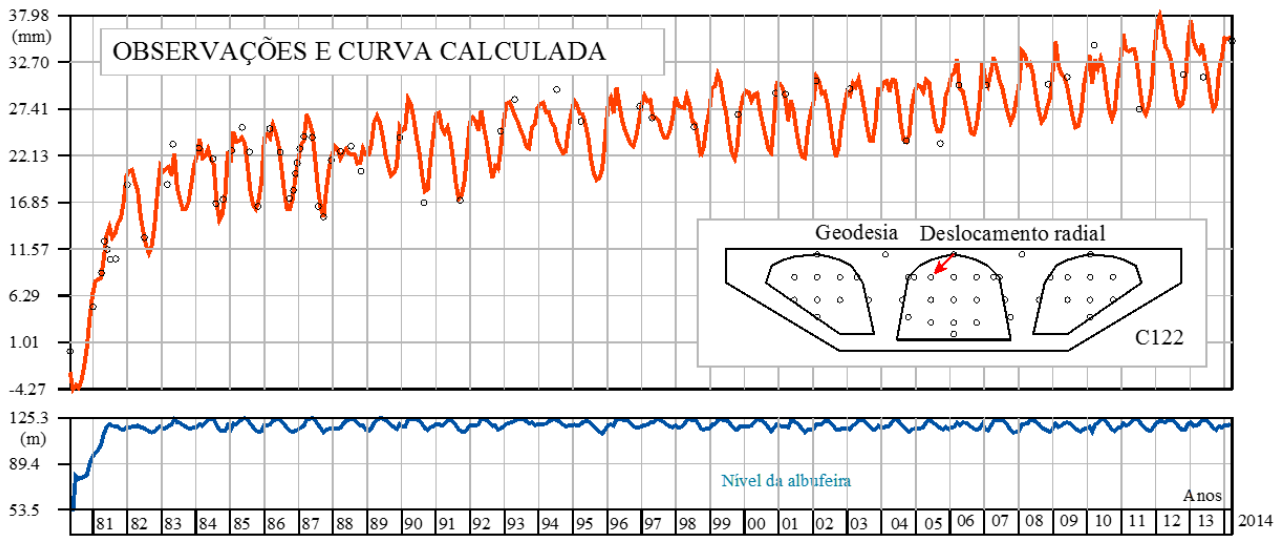
Para além destas indispensáveis potencialidades gráficas e de interatividade, os sistemas informáticos de apoio ao controlo da segurança de barragens devem evoluir no sentido de também disponibilizar aos utilizadores (técnicos envolvidos nas diversas atividades de controlo da segurança) módulos que permitam:

- i) analisar a evolução ao longo do tempo das grandezas observadas com base em modelos de separação de efeitos (MSE), como p.ex. o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ);
- ii) usar modelos de elementos finitos (MEF) para simular o comportamento observado, sob a ação das principais solicitações, nomeadamente, a pressão hidrostática para diversos níveis de água, e as variações térmicas anuais;
- iii) comparar as observações e os resultados dos modelos de separação de efeitos com os resultados previstos com base nos modelos de elementos finitos (comparação MSE/MEF, Figura 1.2).

Os referidos sistemas informáticos podem, inclusivamente evoluir no sentido da automatização da análise, incluindo módulos que efetuem periodicamente a análise das principais grandezas com base nos referidos MSE e MEF, gerando automaticamente gráficos como os da Figura 1.2, em ficheiros do tipo .DXF (ACAD), os quais são enviados automaticamente via *email* pelo sistema, para os técnicos responsáveis pela segurança estrutural. Desta forma pode aumentar significativamente a capacidade de resposta e a qualidade do trabalho dos responsáveis pela segurança estrutural das obras, uma vez que na análise dos gráficos de comparação MSE/MEF (Figura 1.2) gerados automaticamente pelo sistema informático é possível analisar com maior eficiência e eficácia a evolução da resposta observada verificando em que medida corresponde à resposta prevista, o que é fundamental para apoiar as decisões que se exigem, no dia-a-dia, aos técnicos responsáveis pela garantia das boas condições de funcionalidade e de segurança das obras.

O trabalho apresentado nesta dissertação enquadra-se precisamente na referida perspetiva de desenvolvimento de módulos computacionais para apoio ao controlo da segurança estrutural de grandes barragens de betão, neste caso barragens-abóbada (Oliveira S. , 1991), (Oliveira S. , 2000) e (Dias & Oliveira, 2006), com interfaces gráficas que facilitem a realização de estudos envolvendo a utilização integrada de modelos de separação de efeitos e de modelos de elementos finitos (MSE/MEF).

DESLOCAMENTO RADIAL OBSERVADO AO LONGO DO TEMPO NO TOPO DA ABÓBADA CENTRAL DA BARRAGEM DA AGUIEIRA. CURVA AJUSTADA (MMQ) CORRESPONDENTE A UM MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS



ANÁLISE DOS VÁRIOS EFEITOS (MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS) E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE UM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

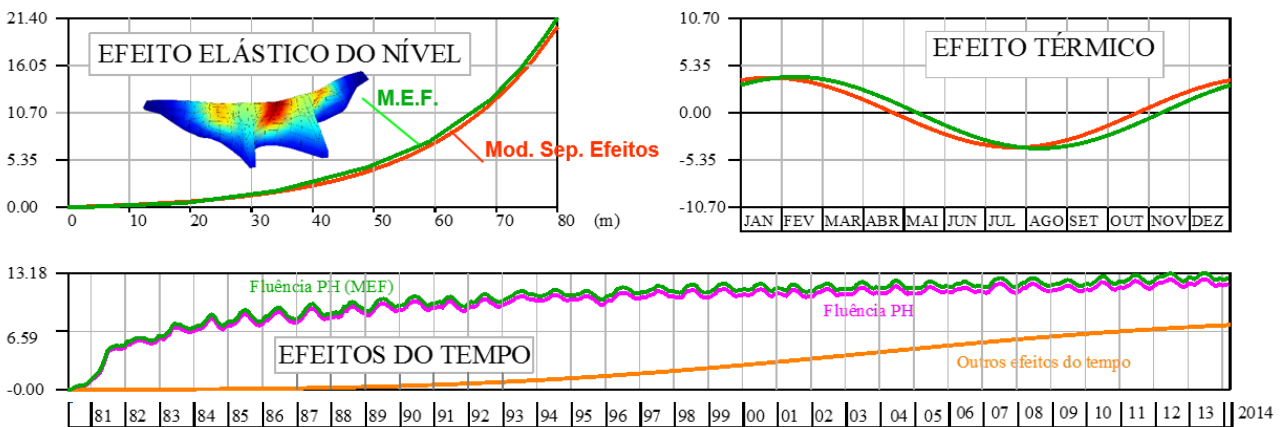


Figura 1.2 – Utilização integrada de modelos de separação de efeitos e modelos elementos finitos.

1.3 Objetivos da Dissertação

O principal objetivo desta dissertação é apresentar o desenvolvimento do programa DamSafe1.0 na perspetiva de mostrar o interesse da utilização integrada de MSE e MEF recorrendo a módulos computacionais interativos e com adequadas interfaces gráficas. A interface gráfica do programa DamSafe1.0 foi desenvolvida com base na plataforma GUIDE do MATLAB (Figura 1.3) e foi estruturada em cinco painéis (Figura 1.4) com vista a facilitar a utilização integrada de modelos de separação de efeitos (com diferentes parâmetros, a escolher interativamente) e de modelos numéricos de elementos finitos (com possibilidade de escolher diferentes módulos de elasticidade para o betão e para a fundação) na análise das principais grandezas observadas em barragens de betão. Os dados da observação utilizados pelo **DamSafe1.0** são retirados do **GestBarragens** e os dados referentes aos modelos de elementos finitos (ainda não disponíveis no **GestBarragens**) são fornecidos ao **DamSafe1.0** em ficheiros de dados no formato .XLS.

Para mostrar as diversas potencialidades do **DamSafe1.0** e o interesse da sua utilização no controlo da segurança estrutural de barragens mostram-se resultados de aplicação ao caso da barragem da Aguieira. Com este exemplo de aplicação é possível salientar alguns dos aspetos inovadores introduzidos no **DamSafe1.0**, nomeadamente ao nível dos modelos de separação de efeitos que permitem considerar funções exponenciais na representação do efeito do nível e permitem a separação dos efeitos do tempo numa parcela viscoelástica devida ao efeito do nível e numa parcela associada aos restantes efeitos do tempo que, no caso da barragem da Aguieira, envolve os efeitos associados às expansões.

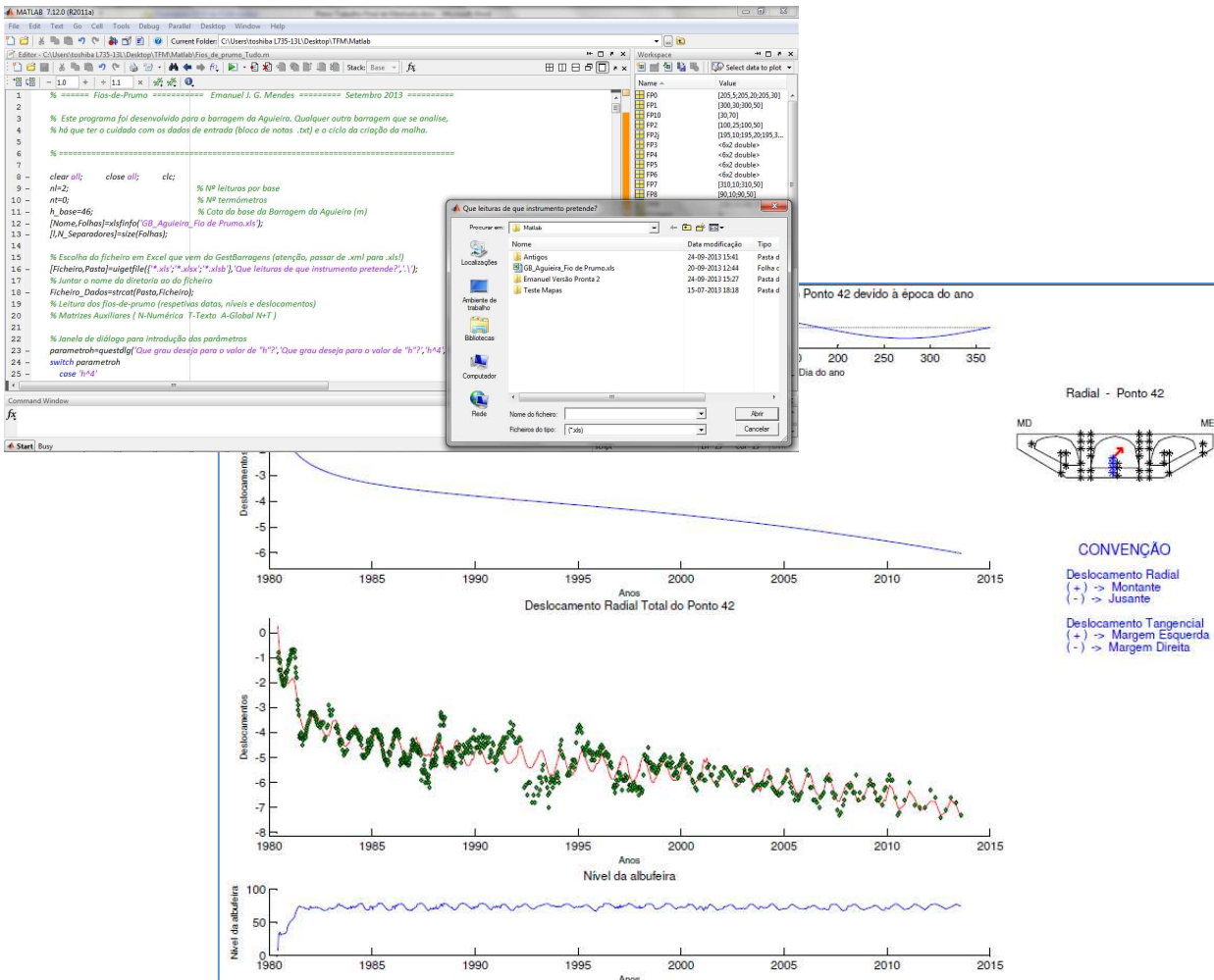
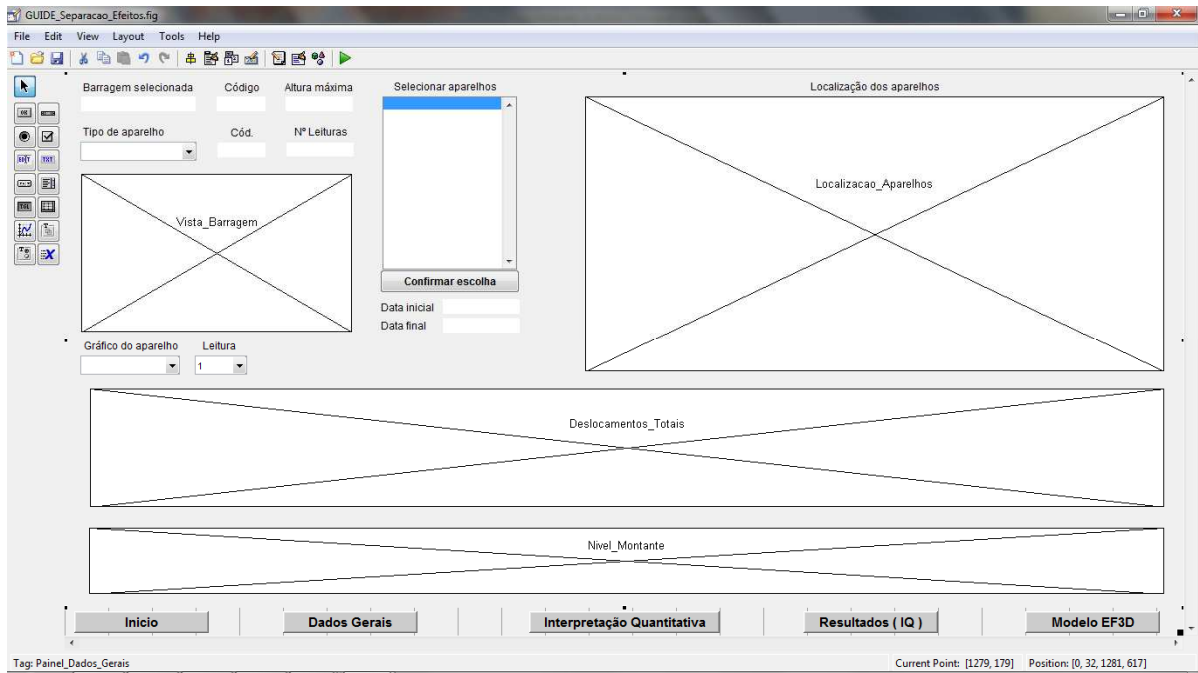


Figura 1.3 – Programação em MATLAB/GUIDE. Plataforma GUIDE para desenvolvimento de projetos com interfaces gráficas, editor do MATLAB e exemplo de uma figura gerada pelo MATLAB.

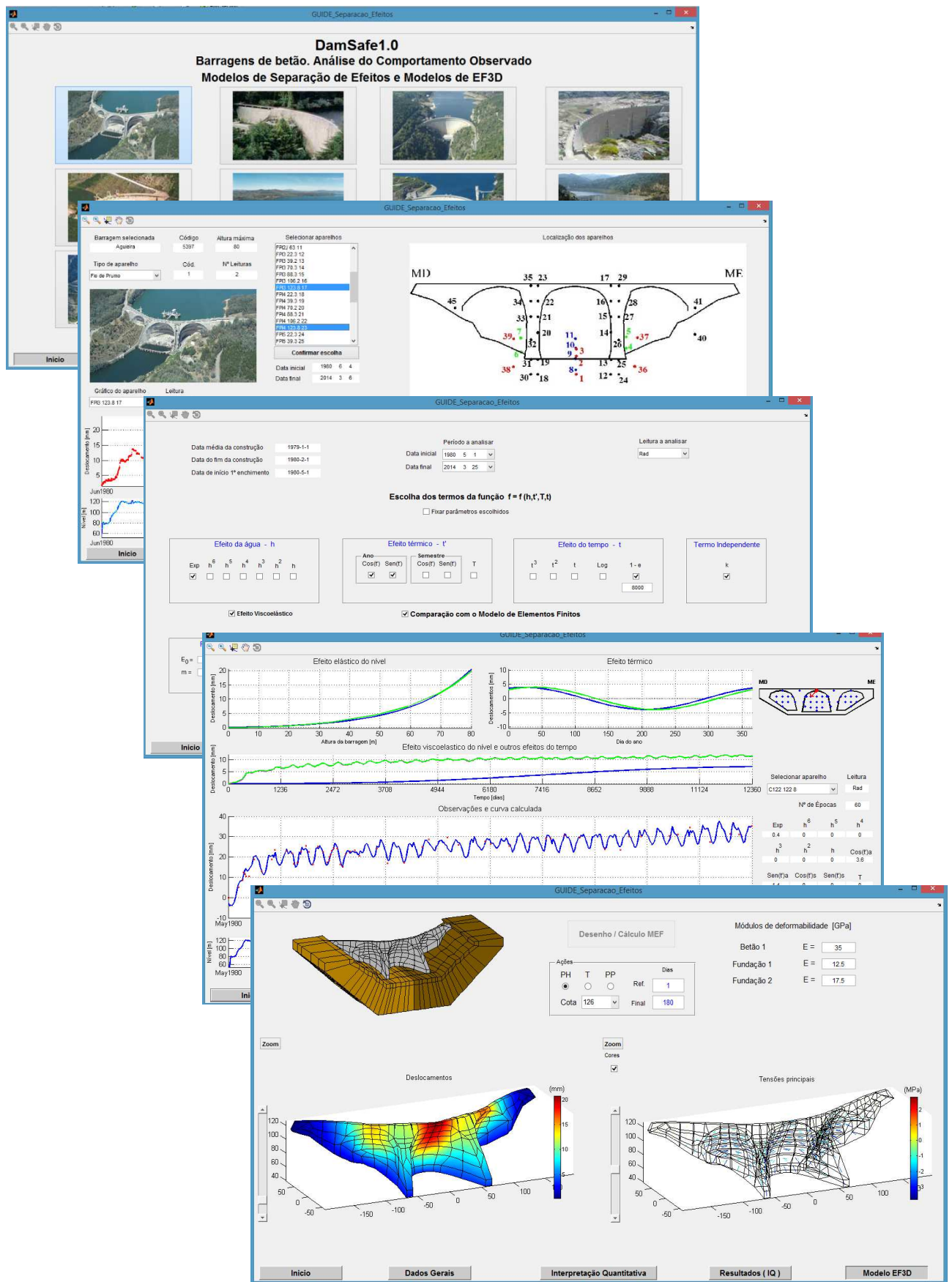


Figura 1.4 – GUIDE: Interface gráfica. Painel “Início”, “Dados Gerais”, “Interpretação Quantitativa”, “Resultados IQ” e “Modelo EF3D”.

1.4 Estruturação do trabalho

Capítulo 2: Modelos Utilizados no Controlo da Segurança de Barragens

Neste capítulo apresentam-se os modelos que são usualmente adotados no controlo da segurança de barragens de betão em fase de exploração: i) Modelos de Elementos Finitos (MEF); e ii) Modelos de Separação de Efeitos (MSE). Apresentam-se inicialmente os fundamentos da mecânica estrutural, com o objetivo de deduzir a equação de Navier, salientando que, na análise estrutural de barragens, esta equação é resolvida numericamente pelo MEF. Apresentam-se os fundamentos do MEF na perspetiva do desenvolvimento de programas para análise estrutural de barragens de betão (modelos de elementos finitos tridimensionais). Em seguida, apresentam-se os fundamentos dos Modelos de Separação de Efeitos utilizados na análise dos deslocamentos observados em barragens de betão, ao longo do tempo. Salientam-se alguns dos aspetos inovadores introduzidos neste trabalho ao nível dos MSE: i) possibilidade de separação dos efeitos do tempo numa parcela viscoelástica devida ao efeito do nível e numa parcela associada aos restantes efeitos do tempo; e ii) consideração de funções exponenciais na representação do efeito do nível. Por fim salienta-se o interesse da utilização integrada de resultados de observação, modelos numéricos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos.

Capítulo 3: DamSafe1.0. Programa em MATLAB para Análise do Comportamento Estrutural de Barragens de Betão

Aqui, apresenta-se o programa **DamSafe1.0**, desenvolvido em MATLAB. Salienta-se que este programa foi desenvolvido na perspetiva de facilitar a utilização integrada de MSE e MEF. A interface gráfica do programa, desenvolvida com base na plataforma GUIDE do MATLAB, foi estruturada em cinco painéis com vista a facilitar a utilização integrada de modelos de separação de efeitos (com diferentes parâmetros, a escolher interativamente) e de modelos numéricos de elementos finitos (com possibilidade de escolher diferentes módulos de elasticidade para o betão e para a fundação) na análise das principais grandezas observadas em barragens de betão. Refere-se que os dados da observação utilizados pelo **DamSafe1.0** são obtidos através do sistema **GestBarragens**, atrás referido, e os dados referentes aos modelos de elementos finitos (ainda não disponíveis no **GestBarragens**) são fornecidos ao **DamSafe1.0** em ficheiros de dados no formato Microsoft Excel (*.xls).

Capítulo 4: Utilização do programa DamSafe1.0 na análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira

Este é o capítulo em que se mostram as diversas potencialidades do **DamSafe1.0** e o interesse da sua utilização no controlo da segurança estrutural de barragens, apresentando os resultados da sua aplicação ao caso da análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira. Com este exemplo de aplicação é possível salientar alguns dos aspetos inovadores introduzidos no programa, nomeadamente no que se refere à definição dos modelos de separação de efeitos, onde é possível considerar funções exponenciais na representação do efeito do nível e separar os efeitos do tempo numa parcela viscoelástica associada ao efeito do nível e numa parcela devida a outros efeitos do tempo que, no caso da barragem da Aguieira, envolve os efeitos devidos a expansões no betão.

Capítulo 5: Conclusão

No capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões do trabalho, apreciação de resultados obtidos e perspetivam-se os desenvolvimentos futuros com vista a melhorar as ferramentas computacionais utilizadas na monitorização e no controlo da segurança estrutural de barragens de betão.

2

Modelos Utilizados no Controlo da Segurança de Barragens

2.1 Generalidades

O controlo da segurança de barragens de betão em fase de exploração baseia-se na análise de resultados observados, recorrendo à utilização integrada de dois tipos de modelos:

- Modelos numéricos de elementos finitos (baseados nas equações fundamentais da mecânica estrutural: equação de Navier); e
- Modelos de separação de efeitos (permitem analisar as séries temporais das grandezas observadas com base na aplicação de regressões lineares múltiplas para ajustar funções representativas dos efeitos das diferentes ações: estas funções são escolhidas de forma semi-empírica, e podem envolver termos polinomiais, exponenciais, harmónicos, ou logarítmicos).

Durante a fase de exploração das grandes barragens há que avaliar periodicamente quais as respetivas condições de segurança e funcionalidade: os resultados dessas avaliações devem basear-se na comparação entre os resultados observados (séries temporais das diversas grandezas observadas) e os resultados previstos com base em modelos numéricos de elementos finitos.

Nas barragens com sistemas de recolha automática de dados, esta avaliação deve ser feita com base em resultados gerados automaticamente recorrendo a *software* preparado para analisar as séries temporais observadas, com recurso aos referidos modelos de separação de efeitos, e para efetuar de forma automática a comparação com resultados de modelos numéricos de elementos finitos, previamente calibrados.

A Figura 2.1 ilustra, esquematicamente, a utilização integrada de modelos de separação de efeitos e de modelos numéricos de elementos finitos no controlo da segurança de barragens de betão. Salienta-se que os modelos de separação de efeitos implementados no âmbito desta dissertação, permitem a separação dos efeitos do tempo em duas parcelas (Oliveira S. , 2000) o que corresponde a uma evolução dos modelos usualmente implementados, (Rocha, Serafim, & Silveira, 1958); (Willm & Beaujoint, 1967); (Gomes S. , 1981); (Castro, 1998) e (Mata, 2013), considerando as quatro parcelas seguintes:

- i) efeito da pressão hidrostática;
- ii) efeito da onda térmica anual;
- iii) efeito do tempo devido à fluência associada à pressão hidrostática (efeito viscoelástico, não patológico);
- iv) outros efeitos do tempo, associados, por exemplo, a expansões (efeito patológico).

No âmbito deste trabalho, e na sequência do que tem sido a prática do LNEC no controlo da segurança destas barragens, foi desenvolvido o programa **DamSafe1.0**, o qual está preparado para aceder a uma base de dados com algumas das principais grandes barragens portuguesas com vista a apoiar a análise do comportamento das obras com base na utilização integrada de modelos de separação de efeitos e de modelos numéricos de elementos finitos tridimensionais. O programa **DamSafe1.0** inclui, portanto, duas componentes:

- i) uma, que permite efetuar os cálculos estruturais das diferentes barragens através do MEF (a base de dados inclui, para cada barragem, a respetiva malha de elementos finitos) considerando a hipótese de comportamento elástico e considerando as principais solicitações (peso próprio, pressão hidrostática para diferentes cotas de água, e variações térmicas de período anual); e outra
- ii) que permite efetuar a análise das séries temporais das diferentes grandezas observadas com base nos referidos modelos de separação de efeitos.

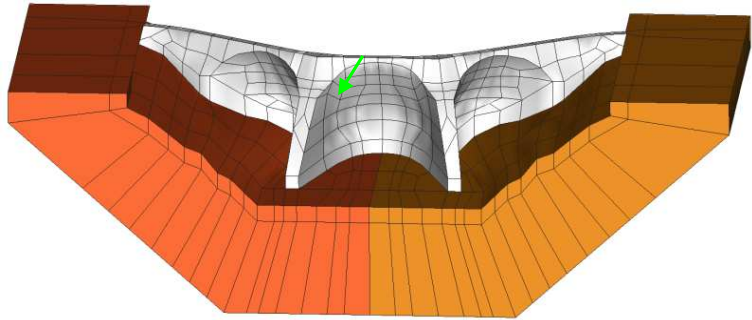
O programa **DamSafe1.0** foi desenvolvido em MATLAB a partir de programas em Fortran desenvolvidos no LNEC (NMMF/NMMR (Oliveira S. , 2000)) e tendo como base o programa de EF3D desenvolvido no âmbito de um curso de MATLAB sobre modelação computacional que decorreu no LNEC (Oliveira & Espada, 2013). Nos dois pontos seguintes apresentam-se os fundamentos das duas anteriores componentes do programa **DamSafe1.0**:

- i) modelos de elementos finitos; e
- ii) modelos de separação de efeitos.

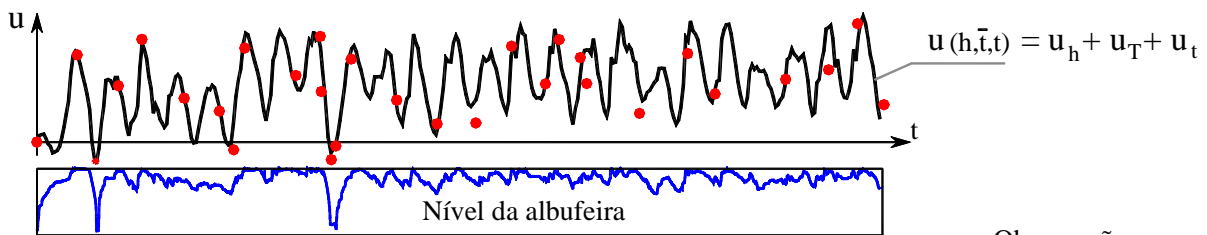
CONTROLO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS EM FASE DE EXPLORAÇÃO

Observação e análise das séries temporais com base em modelos estatísticos de separação de efeitos para apoio à interpretação

Elaboração de modelos de elementos finitos para simulação computacional do comportamento com vista a apoiar estudos de interpretação e para simular o comportamento futuro

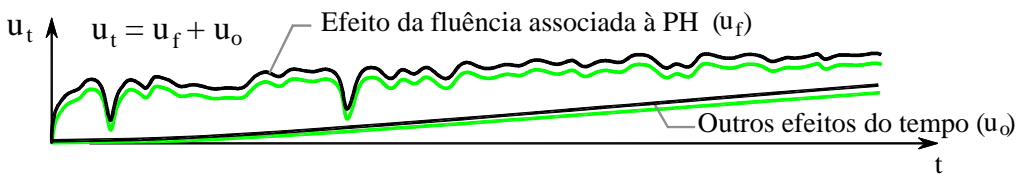
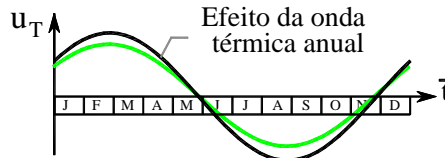
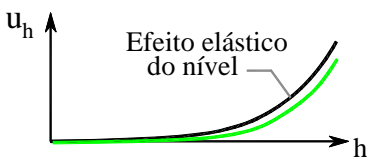


DESLOCAMENTO OBSERVADO E AJUSTAMENTO ESTATÍSTICO USANDO UM MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS



SEPARAÇÃO DOS EFEITOS DEVIDOS ÀS SOLICITAÇÕES PRINCIPAIS

$$u(h, \bar{t}, t) = u_h + u_T + u_t$$



- Observações
- Modelo de separação de efeitos
- Modelo de elementos finitos

Figura 2.1 – Modelos utilizados no controlo de segurança de barragens de betão em fase de exploração.

2.2 Modelos Numéricos de Elementos Finitos

No projeto das primeiras grandes barragens de betão as verificações de segurança baseavam-se em métodos numéricos fundamentados em hipóteses simplificativas (Serafim, 1958) e em modelos físicos. Durante a década de '60 verificou-se um grande desenvolvimento ao nível dos modelos numéricos para análise estrutural das barragens, devido ao aparecimento de computadores com a necessária capacidade de cálculo para a implementação de programas baseados no Método dos Elementos Finitos (Zienkiewicz, 1967) e (Pedro, 1977).

2.2.1 Mecânica dos Sólidos. Formulação do problema

Na análise computacional do comportamento mecânico de estruturas o primeiro objetivo é calcular os campos de deslocamentos, deformações e tensões que se instalam devido à atuação de forças exteriores (Figura 2.2). A resolução deste problema envolve o estabelecimento das equações fundamentais da Mecânica dos Sólidos que, na hipótese de comportamento elástico dos materiais, conduzem a um sistema de equações diferenciais lineares (equação de Navier), cuja solução numérica pode ser obtida utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

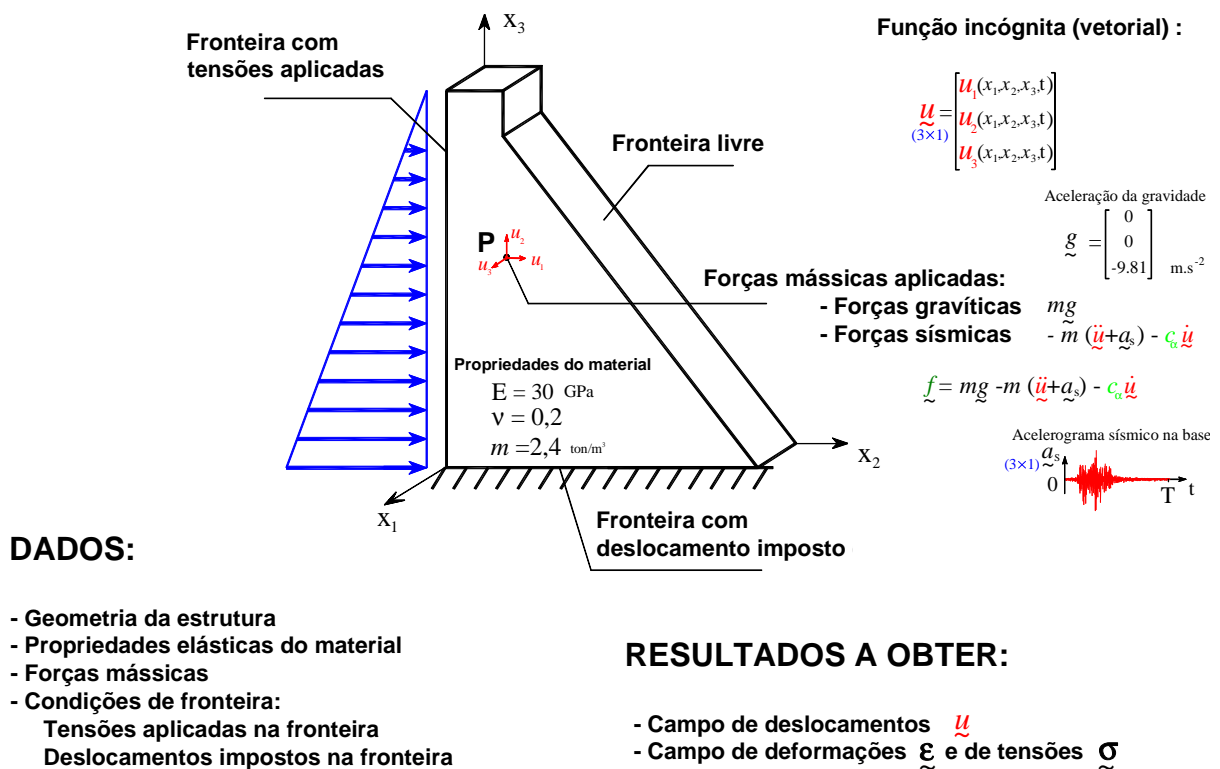


Figura 2.2 – Mecânica dos sólidos. Estabelecimento do problema para o caso geral tridimensional.

2.2.2 Estado de tensão e de deformação num ponto do interior duma estrutura

Para descrever o estado de tensão num ponto P do interior de um sólido (e o estado de deformação) é necessário recorrer ao conceito de grandeza tensorial. As grandezas escalares, como é o caso da temperatura, são representadas em cada ponto por um único valor; o deslocamento é descrito por três valores, correspondentes às componentes de um vetor no espaço, pois o deslocamento é uma grandeza vetorial.

No caso geral tridimensional, a tensão em P é matematicamente descrita por um tensor de segunda ordem que, num dado sistema de eixos ortogonal x_1, x_2, x_3 é representado por uma matriz de 3×3 denominada matriz de tensões $\underline{\sigma}$ como se mostra na Figura 2.3a. O mesmo se passa para o caso do estado de deformação $\underline{\varepsilon}$ (Figura 2.3b).

Fisicamente, conhecer o estado de tensão num ponto P corresponde a conhecer todos os vetores de tensão em qualquer faceta de corte em P. Na prática basta conhecer os vetores de tensão em três facetas de corte mutuamente ortogonais e, por esta razão, o estado de tensão em P fica perfeitamente definido através de uma matriz que em cada linha contém as componentes de cada um dos três vetores de tensão referidos (Figura 2.3a). Da mesma forma, o estado de deformação num ponto fica perfeitamente definido conhecendo os três vetores de deformação associados a três fibras ortogonais (Figura 2.3b).

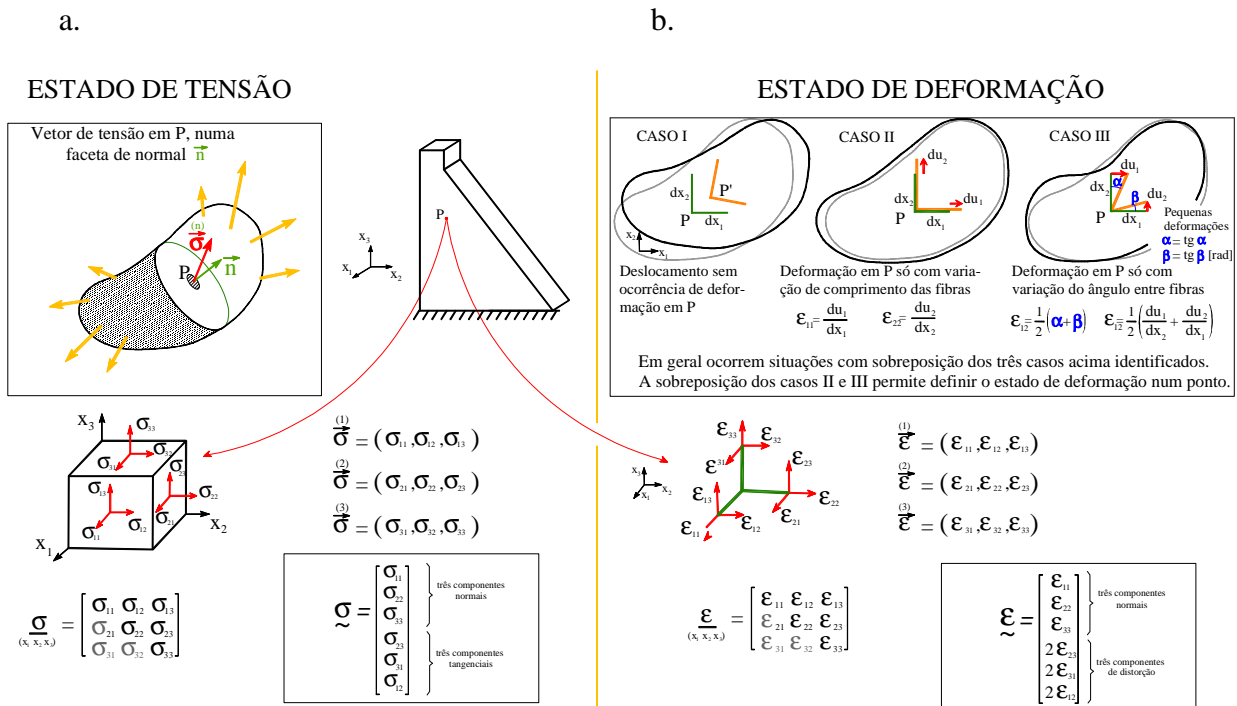


Figura 2.3 – Ponto interior de um sólido: a. Estado de tensão; b. Estado de deformação.

2.2.3 Equações Fundamentais da Mecânica dos Sólidos

No cálculo de uma estrutura (Figura 2.4) submetida a um dado conjunto de forças exteriores o objetivo é determinar para qualquer ponto da estrutura $P(x_1, x_2, x_3)$:

- i) O deslocamento \underline{u} (vetor com três componentes);
- ii) O estado de deformação $\underline{\varepsilon}$ (tensor com seis componentes independentes);
- iii) O estado de tensão $\underline{\sigma}$ (tensor com seis componentes independentes).

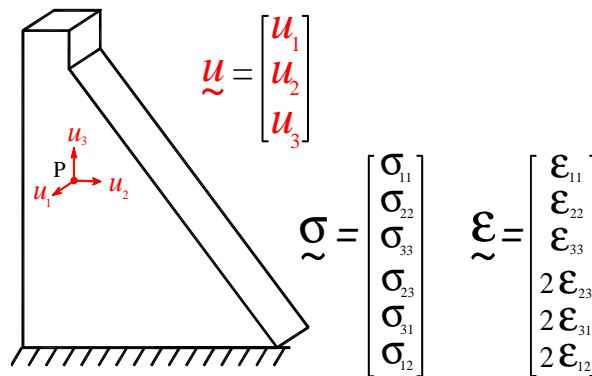


Figura 2.4 – Incógnitas num problema de Mecânica dos Sólidos.

À partida conhece-se:

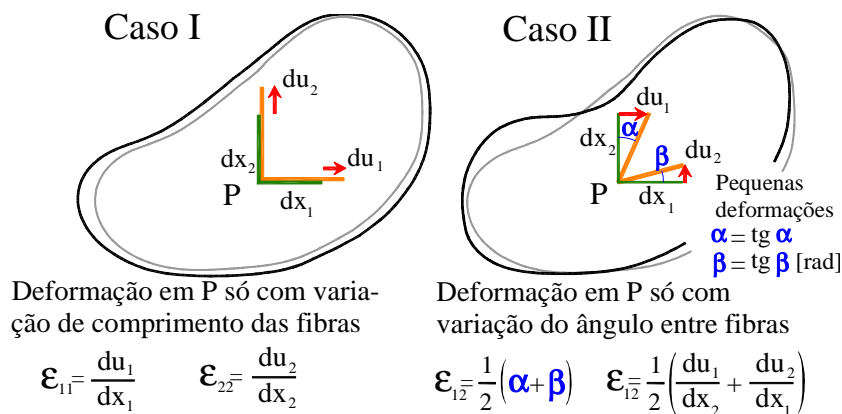
1. A geometria da estrutura;
2. As propriedades dos materiais;
3. As forças mássicas (três componentes: kN/m^3);
4. As condições de fronteira – forças aplicadas na fronteira e apoios (rígidos e/ou elásticos).

Em cada ponto da estrutura é possível estabelecer 15 equações, que relacionam:

- i) Deslocamentos e deformações (seis equações diferenciais, de compatibilidade);
- ii) Deformações e tensões (seis equações algébricas, constitutivas);
- iii) Tensões e forças mássicas (três equações diferenciais, de equilíbrio).

2.2.3.1 Relação deformação-deslocamento – Equação de compatibilidade

Na Figura 2.5, apresenta-se a definição de deformação normal e de deformação distorcional (respetivamente, casos I e II). No caso tridimensional existem três componentes de deformação normal e três componentes de deformação distorcional, que são dadas pelas seis equações diferenciais definidas na figura seguinte, e que se escrevem matricialmente recorrendo ao operador diferencial \underline{L} .



$$\begin{cases} \epsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \\ \epsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \\ \epsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \\ \epsilon_{23} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2}\right) \\ \epsilon_{31} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3}\right) \\ \epsilon_{12} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{31} \\ 2\epsilon_{12} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{L} \text{ Operador diferencial } (6 \times 3)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} \underline{\epsilon} & = & \underline{L} & \underline{u} \\ (6 \times 1) & & (6 \times 3) & (3 \times 1) \end{matrix}$$

Figura 2.5 – Relação entre deformações e deslocamentos.

2.2.3.2 Relação Tensões-Deformações – Equação constitutiva

No caso de um material elástico isotrópico com módulo de elasticidade E (kN/m^2) e coeficiente de Poisson ν (adimensional com valor da ordem de 0,2 para materiais como o aço ou o betão), a deformação normal ϵ_{11} de uma fibra na direção do eixo x_1 é dada por $\epsilon_{11} = \sigma_{11}/E$, se existir apenas a componente de tensão normal σ_{11} (o módulo de elasticidade E corresponde a uma constante de proporcionalidade entre tensões e deformações). No caso geral em que as componentes σ_{22} e σ_{33} não são nulas, a deformação ϵ_{11} depende também do coeficiente de Poisson e dos valores de σ_{22} e σ_{33} , como se mostra na Figura 2.6 (para uma tensão normal aplicada numa dada direção, o coeficiente de Poisson ν correspondente ao valor absoluto do quociente entre a deformação que ocorre na direção transversal e a que ocorre na direção da tensão aplicada). Na Figura 2.6 apresentam-se, para o caso geral tridimensional, as relações entre tensões e deformações para materiais elásticos e isotrópicos onde se indicam as componentes da matriz de elasticidade inversa \underline{D}^{-1} .

Material elástico e isotrópico (dois parâmetros elásticos: E, ν)

$$\begin{cases} \epsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} - \nu \frac{\sigma_{22}}{E} - \nu \frac{\sigma_{33}}{E} \\ \epsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E} - \nu \frac{\sigma_{11}}{E} - \nu \frac{\sigma_{33}}{E} \\ \epsilon_{33} = \frac{\sigma_{33}}{E} - \nu \frac{\sigma_{11}}{E} - \nu \frac{\sigma_{22}}{E} \\ 2\epsilon_{23} = \frac{\sigma_{23}}{G} \\ 2\epsilon_{31} = \frac{\sigma_{31}}{G} \\ 2\epsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G} \end{cases}$$

ϵ_{11}	$\frac{1}{E}$	$-\frac{\nu}{E}$	$-\frac{\nu}{E}$	0	σ_{11}
ϵ_{22}	$-\frac{\nu}{E}$	$\frac{1}{E}$	$-\frac{\nu}{E}$	0	σ_{22}
ϵ_{33}	$-\frac{\nu}{E}$	$-\frac{\nu}{E}$	$\frac{1}{E}$	0	σ_{33}
$2\epsilon_{23}$	0	0	0	$\frac{1}{G}$	σ_{23}
$2\epsilon_{31}$	0	0	0	$\frac{1}{G}$	σ_{31}
$2\epsilon_{12}$	0	0	0	$\frac{1}{G}$	σ_{12}

(material isotrópico) \underline{D}^{-1} Matriz de elasticidade inversa

$$\underline{\sigma} = \underline{D} \underline{\epsilon}$$

(6×1) (6×1)

$$\underline{\epsilon} = \underline{D}^{-1} \underline{\sigma}$$

E - módulo de elasticidade

ν - coeficiente de Poisson

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ módulo de distorção

Matriz de elasticidade expressa em termos do módulo de deformabilidade volumétrica (K_v) e do módulo de distorção (G)

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} K_v + \frac{4}{3}G & K_v - \frac{2}{3}G & K_v - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ & K_v + \frac{4}{3}G & K_v - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ \text{sim.} & & K_v + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ & & & 0 & G & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix}$$

(6×6)

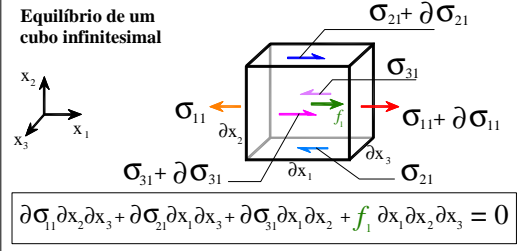
$$K_v = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Figura 2.6 – Relação tensões-deformações. Matriz de elasticidade para materiais isotrópicos.

2.2.3.3 Relação entre tensões e forças mássicas – Equação de equilíbrio

Em cada ponto do interior de uma estrutura deve-se garantir o equilíbrio entre as tensões $\underline{\sigma}$ (kN/m²) e as forças mássicas \underline{f} (kN/m³). Para tal basta considerar o equilíbrio de forças num volume infinitesimal como se ilustra na Figura 2.7. (Repare-se que o esquema da figura é referente apenas ao equilíbrio de forças na direção do eixo x_1).

$$\begin{aligned} \Sigma F_{x_1} = 0 &\rightarrow \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} + f_1 = 0 \right) \rightarrow \\ \Sigma F_{x_2} = 0 &\rightarrow \left(\frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_3} + f_2 = 0 \right) \\ \Sigma F_{x_3} = 0 &\rightarrow \left(\frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + f_3 = 0 \right) \end{aligned}$$



$$\partial \sigma_{11} \partial x_2 \partial x_3 + \partial \sigma_{21} \partial x_1 \partial x_3 + \partial \sigma_{31} \partial x_1 \partial x_2 + f_1 \partial x_1 \partial x_2 \partial x_3 = 0$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

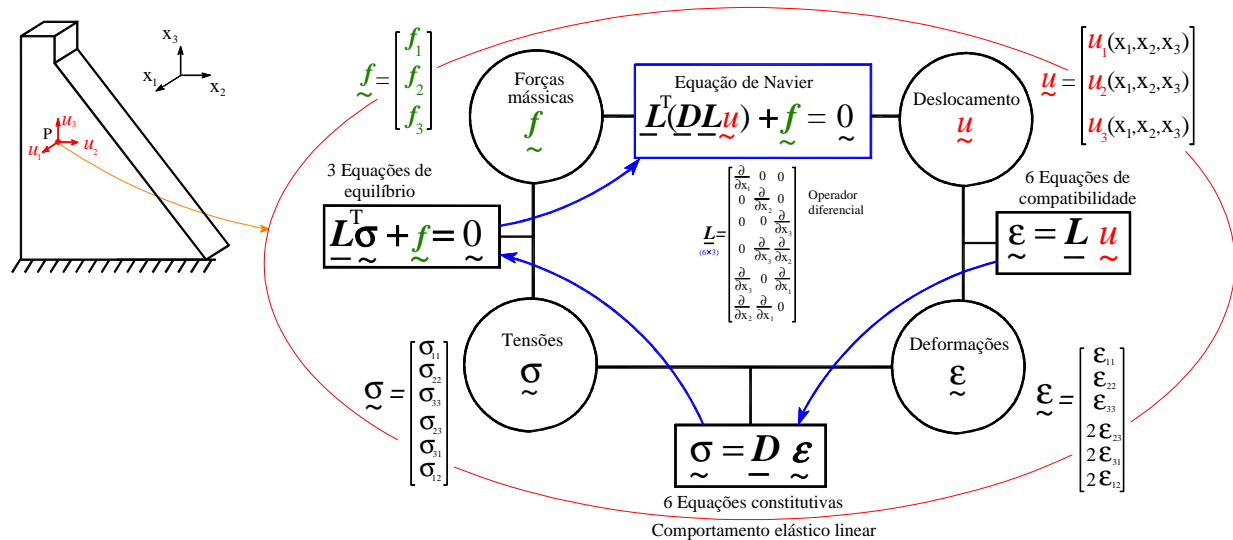
$$\underline{L}^T \underline{\sigma} + \underline{f} = \underline{0}$$

(3×6) (6×1) (3×1) (3×1)

Figura 2.7 – Relações tensões-forças mássicas. Equação de equilíbrio.

2.2.4 Equação de Navier

Como se pode ver na Figura 2.8 é possível obter uma equação diferencial que relaciona os deslocamentos com as forças mássicas a qual é denominada equação de Navier (Oliveira A. , 1975). Esta é a equação fundamental da Mecânica dos Sólidos (formulação em deslocamentos).



NOTA:

As forças mássicas \underline{f} podem ser forças gravíticas (peso específico), forças de inércia associadas a acelerações sísmicas ou ainda forças de amortecimento.

Figura 2.8 – Equações fundamentais da Mecânica dos Sólidos. Formulação em deslocamentos: equação de Navier.

Num problema de Mecânica dos Sólidos formulado em deslocamentos, há que resolver o seguinte problema de valores de fronteira, envolvendo a equação de Navier (equação diferencial envolvendo derivadas parciais de segunda ordem da função incógnita \underline{u}).

$$\begin{cases} \underline{L}^T (\underline{D} \underline{L} \underline{u}) + \underline{f} = \underline{0} & , \text{ a verificar em toda a estrutura } V \\ \text{Condições de fronteira} \end{cases} \quad (2.1)$$

Com exceção de alguns casos elementares, não é possível obter uma solução analítica exata para o anterior problema de valores de fronteira. Em geral recorre-se a métodos numéricos, nomeadamente ao MEF, que é atualmente o método mais utilizado para obter soluções aproximadas das equações da Mecânica, em problemas de qualquer tipo de complexidade.

2.2.5 Forma fraca da equação de Navier

Para se utilizar o MEF com vista a obter soluções numéricas da equação de Navier (descrita atrás na Figura 2.8) é necessário começar por obter a correspondente forma integral ou forma fraca, o que se consegue através da aplicação do Lema Fundamental do Cálculo Variacional³ e do Teorema de Green-Gauss à anterior forma forte (nota: utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais pode-se obter diretamente a forma fraca da equação de Navier).

A aplicação do LFCV à equação anterior (2.1) permite escrever:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_V \underline{v}^T \cdot (\underline{L}^T (\underline{D}\underline{L}\underline{u}) + \underline{f}) dV = 0 \quad , \quad \forall \underline{v} \in C_V^\infty \\ \text{Condições de fronteira} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

e por aplicação do Teorema de Green-Gauss (correspondente à aplicação do teorema da integração por partes em problemas unidimensionais) obtém-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_V (\underline{L}\underline{v})^T \underline{D}\underline{L}\underline{u} dV = \int_V \underline{v}^T \underline{f} dV \quad , \quad \forall \underline{v} \in C_V^\infty \\ \text{Condições de fronteira} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

sendo de notar que nesta forma apenas surgem derivadas parciais de primeira ordem da função incógnita \underline{u} .

³ Lema Fundamental do Cálculo Variacional (LFCV)

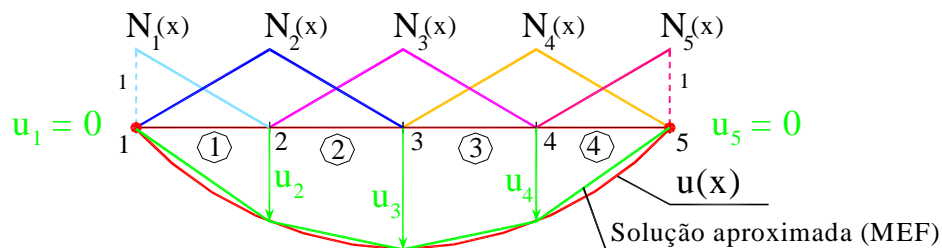
Se $F(x)$ é uma função contínua definida em $V =]0,L[$ então,

$$F(x) = 0, \quad x \in V \Leftrightarrow \int_V F(x) \cdot \underline{v}(x) dx = 0 \quad , \quad \text{para toda a função de teste } \underline{v}(x) \in C_V^\infty$$

Nota: As funções de teste $\underline{v}(x)$ referidas neste lema são funções contínuas infinitamente diferenciáveis de suporte compacto em V , que correspondem ao conceito de campos de deslocamentos virtuais que é utilizado no enunciado do Princípio dos Trabalhos Virtuais.

2.2.6 Fundamentos do Método dos Elementos Finitos

Na resolução numérica de problemas de valor de fronteira pelo método dos elementos finitos (MEF) o domínio é discretizado num dado número de elementos (NE) de dimensão finita (elementos finitos – EF) ligados entre si por pontos nodais. O objetivo consiste em determinar os deslocamentos em todos os pontos nodais (NP) (no caso de problemas tridimensionais há que determinar três componentes de deslocamento por nó). A ideia chave do MEF consiste em adotar a hipótese de que o campo de deslocamentos $\underline{u} = \underline{u}(x_1, x_2, x_3)$ pode ser aproximado através de uma combinação linear dos deslocamentos nos nós, utilizando um conjunto de funções N_i denominadas funções de interpolação polinomiais (para um dado nó i a função de interpolação N_i assume o valor unitário nesse nó e valor nulo em todos os outros nós) (Zienkiewicz, 1967) e (Hughes, 1987). Para ilustrar graficamente o conceito de funções de interpolação e respetiva combinação linear para aproximar a solução, mostra-se na Figura 2.9 a aplicação do MEF à análise de um cabo elástico suspenso nas extremidades.



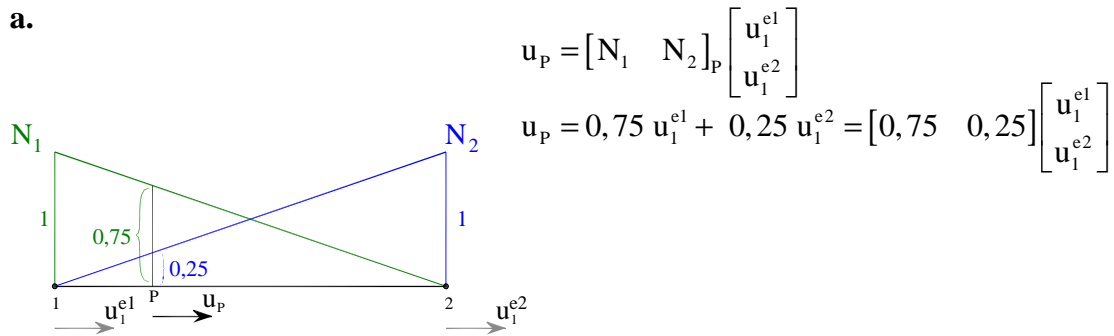
$$\underline{u}(x) = N_1 \underline{u}_1 + N_2 \underline{u}_2 + N_3 \underline{u}_3 + N_4 \underline{u}_4 + N_5 \underline{u}_5$$

$$\underline{u}(x) = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) & N_3(x) & N_4(x) & N_5(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}_1 \\ \underline{u}_2 \\ \underline{u}_3 \\ \underline{u}_4 \\ \underline{u}_5 \end{bmatrix} \quad \underline{u}(x) = \underline{N} \underline{u}$$

Figura 2.9 – Discretização de um cabo em quatro EF e representação de uma solução aproximada dada pela combinação linear de funções simples definidas por treços lineares (funções de interpolação $N_i(x)$) (Oliveira & Espada, 2013).

Na implementação computacional do MEF aplica-se o LFCV a cada elemento finito de volume V_e e consideram-se as funções de interpolação N correspondentes aos pontos nodais de cada elemento. Na Figura 2.10 mostram-se as funções de interpolação de um elemento finito linear de dois pontos nodais (como as usadas no exemplo anterior do cabo elástico) e as funções de interpolação de um elemento finito de placa com quatro pontos nodais e dois graus de liberdade por nó (que serão usadas no exemplo que se apresenta no ponto seguinte referente a uma barragem).

a.



b.

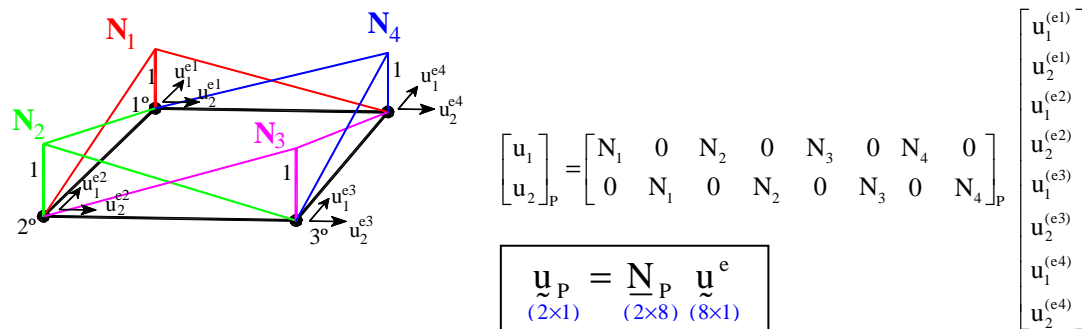


Figura 2.10 – Funções de interpolação definidas por elemento: a. Elemento finito de barra com dois pontos nodais e um grau de liberdade de translação por nó; b. Elemento finito de placa com quatro pontos nodais e dois graus de liberdade de translação por nó.

O campo de deslocamentos em cada elemento finito é dado pela combinação linear das correspondentes funções de interpolação de acordo com a seguinte expressão

$$\underline{\mathbf{u}} = \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e \tag{2.4}$$

em que $\underline{\mathbf{u}}$ representa os deslocamentos de um ponto qualquer P do interior do elemento finito, $\underline{\mathbf{N}}$ representa a matriz com os valores das funções de interpolação em P e $\underline{\mathbf{u}}^e$ representa o vetor com os valores dos deslocamentos dos nós do elemento.

Admitindo que os campos de deslocamentos virtuais num elemento finito podem ser também aproximados por uma expressão idêntica à anterior

$$\underline{\mathbf{v}} = \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{v}}^e \tag{2.5}$$

então a forma fraca da equação de Navier apresentada na Figura 2.8 pode ser escrita para um elemento finito de volume V_e , introduzindo as duas expressões anteriores, obtendo-se

$$\int_{V_e} \left(\underline{\mathbf{L}}(\underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e) \right)^T \underline{\mathbf{D}} \underline{\mathbf{L}}(\underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e) dV = \int_{V_e} \left(\underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e \right)^T \underline{\mathbf{f}} dV \quad , \quad \forall \underline{\mathbf{u}} = \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e \quad (2.6)$$

A condição anterior pode ser verificada considerando apenas as funções $\underline{\mathbf{N}}$ que formam a base do espaço linear das funções $\underline{\mathbf{u}} = \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}^e$ ficando

$$\int_{V_e} (\underline{\mathbf{L}} \underline{\mathbf{N}})^T \underline{\mathbf{D}} (\underline{\mathbf{L}} \underline{\mathbf{N}}) dV \underline{\mathbf{u}}^e = \int_{V_e} \underline{\mathbf{N}}^T \underline{\mathbf{f}} dV \quad (2.7)$$

em que surge a matriz $\underline{\mathbf{L}} \underline{\mathbf{N}}$ com as derivadas parciais das funções de interpolação que usualmente é designada por $\underline{\mathbf{B}} = \underline{\mathbf{L}} \underline{\mathbf{N}}$ (Zienkiewicz, 1967), escrevendo-se então

$$\int_{V_e} \underline{\mathbf{B}}^T \underline{\mathbf{D}} \underline{\mathbf{B}} dV \underline{\mathbf{u}}^e = \int_{V_e} \underline{\mathbf{N}}^T \underline{\mathbf{f}} dV \quad (2.8)$$

ou

$$\underline{\mathbf{K}}^e \underline{\mathbf{u}}^e = \underline{\mathbf{F}}^e \quad (2.9)$$

em que,

$\underline{\mathbf{K}}^e = \int_{V_e} \underline{\mathbf{B}}^T \underline{\mathbf{D}} \underline{\mathbf{B}} dV$, é a matriz de rigidez do elemento finito;

$\underline{\mathbf{F}}^e = \int_{V_e} \underline{\mathbf{N}}^T \underline{\mathbf{f}} dV$, é o vetor das forças nodais do elemento, equivalentes às forças mássicas.

Na figura seguinte mostra-se esquematicamente como se discretiza uma estrutura em elementos finitos e como se introduz a aproximação fundamental do MEF na forma fraca da equação de Navier para obter as equações de equilíbrio na forma algébrica.

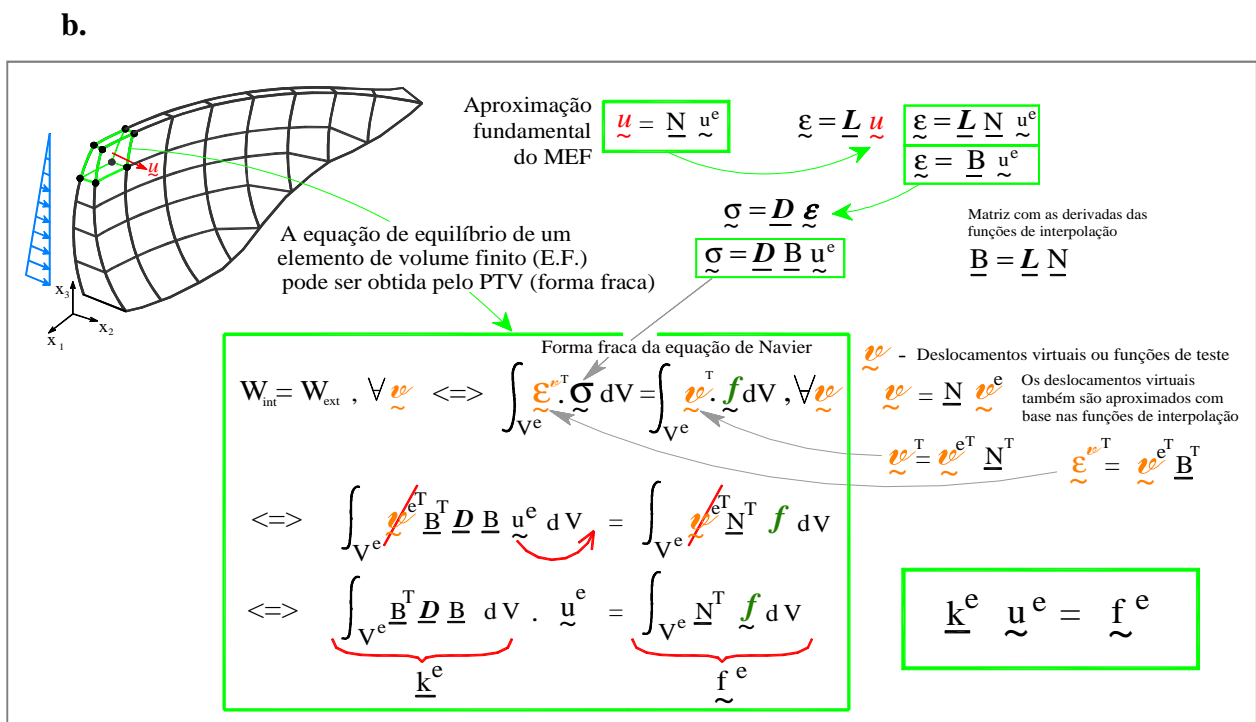
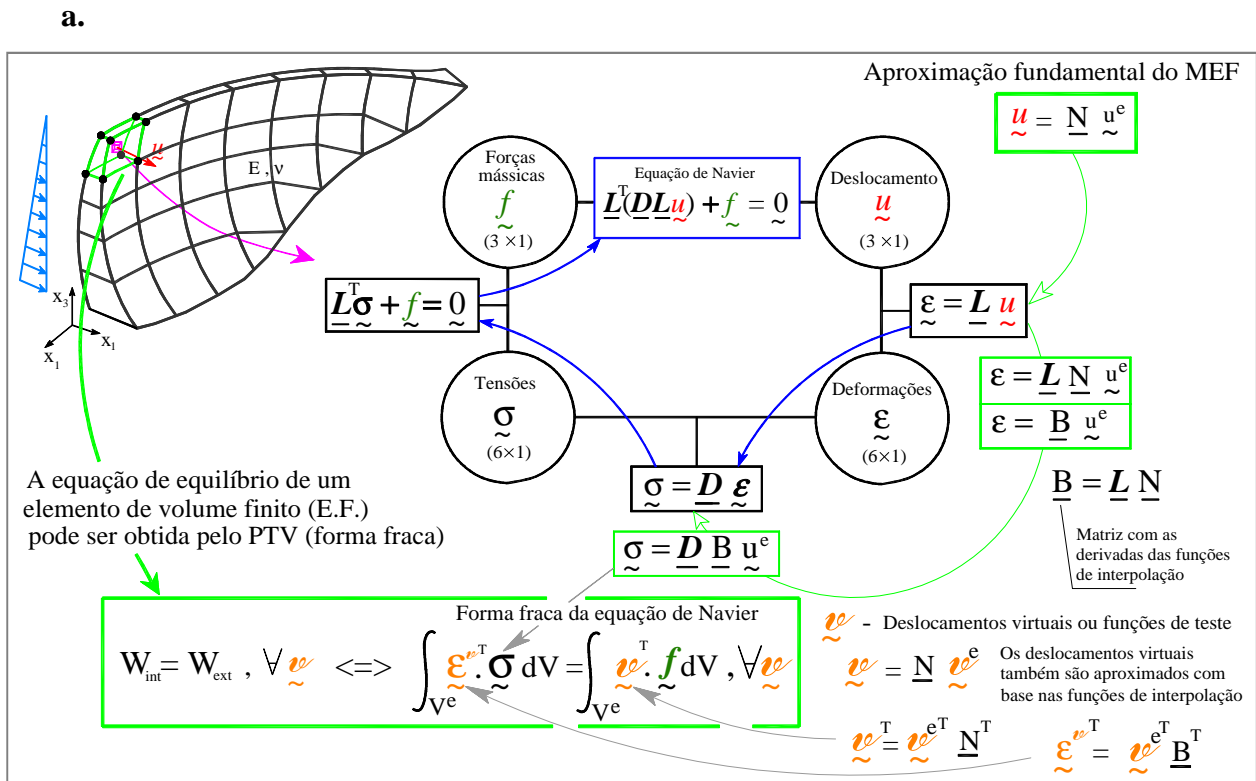


Figura 2.11 – Discretização de uma estrutura em elementos finitos tridimensionais.
a. Introdução da aproximação fundamental do MEF na forma fraca da equação de Navier.
b. Obtenção da equação de equilíbrio de um elemento finito (Oliveira & Espada, 2013).

2.2.7 Elemento finito 3D utilizado no programa DamSafe1.0

No programa **DamSafe1.0** desenvolvido no âmbito deste trabalho, admite-se uma formulação para análise de equilíbrios tridimensionais, considerando o seguinte elemento isoparamétrico de vinte pontos nodais (Figura 2.12).

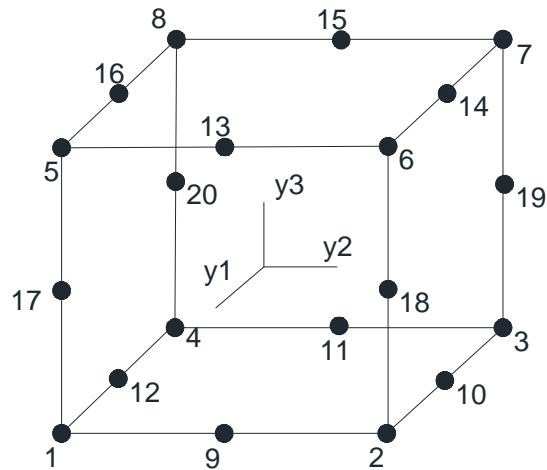


Figura 2.12 – Elemento finito utilizado no programa **DamSafe1.0**. Elemento isoparamétrico de segundo grau, com 20 pontos nodais (Oliveira S. , 2000).

Tratando-se de elementos finitos tridimensionais, foi necessário implementar no modelo de elementos finitos funções de interpolação N_i de segundo grau.

2.3 Modelos de separação de efeitos

2.3.1 Fundamentos

As grandezas observadas ao longo do tempo, no âmbito do controlo da segurança de barragens com base em sistemas de recolha manual ou automática (deslocamentos, acelerações, extensões, tensões, movimento de juntas, caudais, subpressões, frequências próprias, etc.) devem ser analisadas tendo em conta as ações mais significativas. Para cada grandeza, é usual efetuar preliminarmente uma análise qualitativa dos resultados da observação, o que envolve sempre uma dificuldade de interpretação devido ao efeito conjunto das várias ações, sendo que algumas delas são bem conhecidas, como é o caso da pressão hidrostática e, eventualmente, outras serão desconhecidas como pode ser o caso das ações expansivas (Figura 2.13).

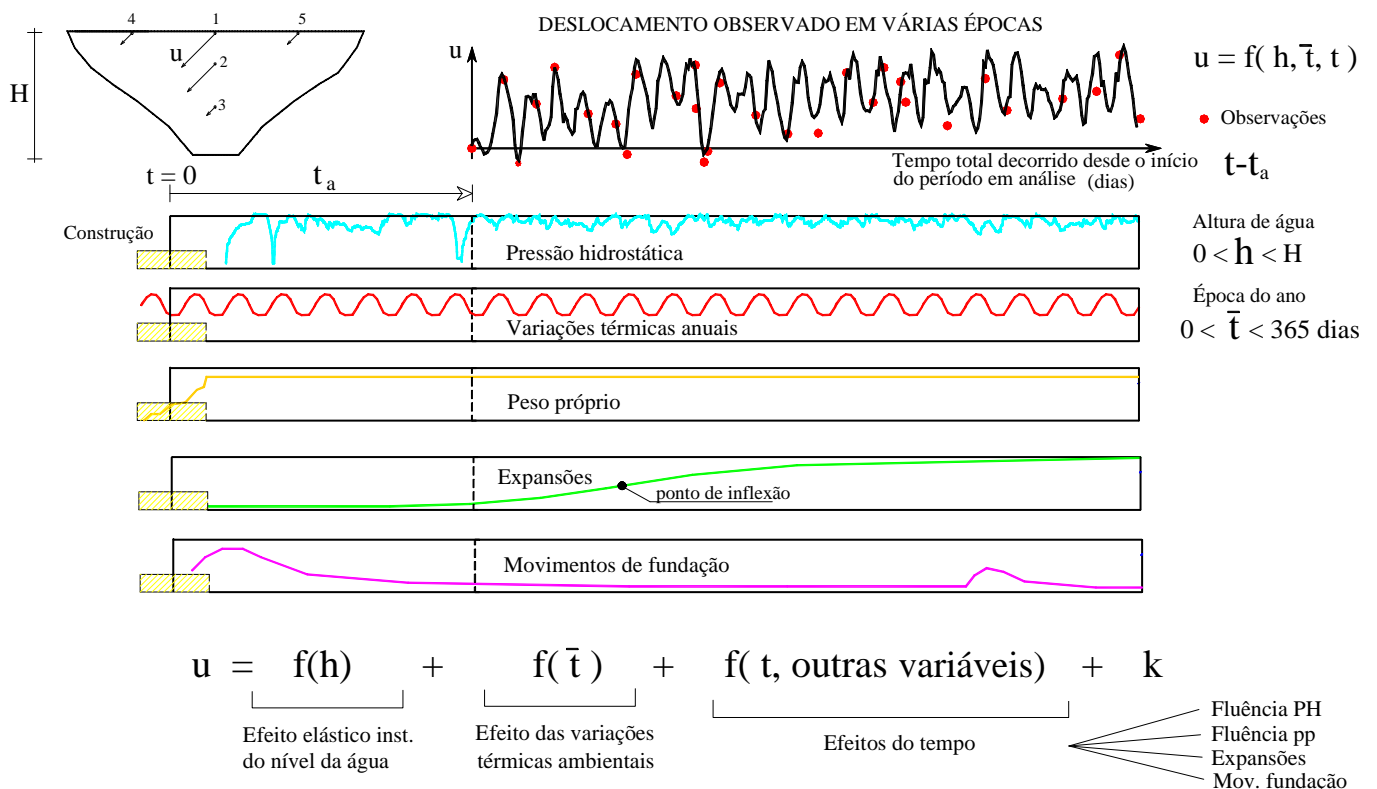


Figura 2.13 – A atuação simultânea de várias ações origina uma resposta global cuja interpretação requer a utilização de modelos que permitam quantificar separadamente os vários efeitos.

Assim que as primeiras grandes barragens entraram em serviço percebeu-se que seria de todo o interesse dispor de modelos de separação dos efeitos ou de interpretação quantitativa (Rocha, 1956); (Willm & Beaujoint, 1967) e (Gomes S. , 1981).

Estes modelos de separação de efeitos baseiam-se no estabelecimento de relações funcionais semi-empíricas entre as grandezas ou efeitos observados e as solicitações que os originam e na análise por técnicas estatísticas de ajuste aos valores observados (minimização de erros pelo método dos mínimos quadrados – MMQ).

Em barragens de betão, o estabelecimento de modelos de separação de efeitos relativos ao período de exploração normal baseia-se nas seguintes hipóteses:

- i) as ações que influenciam predominantemente o comportamento das barragens são a pressão hidrostática e as variações de temperatura associadas à onda térmica anual; para estas solicitações, o comportamento estrutural das obras é essencialmente reversível, elástico ou viscoelástico (com dependência do tempo);
- ii) os efeitos irreversíveis que são, aproximadamente, em função exclusiva do tempo;
- iii) o efeito total observado é igual à soma da parcela dos efeitos reversíveis com a parcela dos efeitos irreversíveis, a menos de um erro de observação ou de modelação.

Por exemplo, para o caso da análise de uma história de deslocamentos observados num dado ponto de uma barragem, as parcelas de deslocamento u_M , calculadas com um modelo de separação de efeitos, por ajuste aos valores observados u_{obs} , podem ser descritas em função de três variáveis:

- Nível de albufeira: h
- Estado térmico: \bar{t} (época do ano, em dias contados a partir de 1 de janeiro)
 T (temperatura em °C medida no corpo da obra)
- Idade da obra: t (tempo total decorrido desde uma época de referência)

escrevendo-se

$$u_M = u_M(h, \bar{t}, t) = \underbrace{u_H(h)}_{\text{Efeito do nível da água}} + \underbrace{u_T(\bar{t})}_{\text{Efeito térmico}} + \underbrace{u_t(t)}_{\text{Efeito do tempo}} + \underbrace{k}_{\text{Termo independente}} \quad (2.10)$$

2.3.1.1 Efeito elástico do nível da água: $u_H(h)$

Esta parcela de deslocamento está associada à variação do nível de água na albufeira e traduz o efeito elástico (instantâneo) da pressão hidrostática. A variável h representa usualmente a altura de água contada a partir da cota mínima da inserção (também poderá representar uma altura de água contada a partir de uma outra cota de referência, em geral superior à cota de albufeira vazia). Para a expressão de $u_H(h)$ são muitas vezes adotadas formas polinomiais envolvendo um ou mais termos com potências de h , do tipo da seguinte

$$u_H(h) = a_4 h^4 + a_3 h^3 \quad (2.11)$$

em que, neste caso, a_3 e a_4 são coeficientes a determinar por ajuste estatístico usando o MMQ. Na anterior expressão, h é a altura de água na albufeira acima de uma cota de referência convenientemente escolhida (muitas vezes coincidente com a cota de água mínima - situação de albufeira quase vazia). No caso das expressões polinomiais é de referir que convém adotar polinômios não completos, sabendo-se que o objetivo principal é fazer com que a função $u_H(h)$ comece do valor nulo para $h=0$ e com tangente horizontal, ou seja, com derivada nula, mas também por forma a reduzir o número de parâmetros a determinar estatisticamente (há vantagem em utilizar sempre que possível expressões com poucos parâmetros, sendo frequente verificar-se que a utilização de monômios ou binômios do quarto grau é adequada). No âmbito desta dissertação foi implementado no programa **DamSafe1.0** um outro tipo de expressão para $u_H(h)$ envolvendo funções exponenciais do tipo seguinte

$$u_H(h) = a \left(e^{h/c_f} - 1 \right) \quad (2.12)$$

em que h representa a altura de água (acima de uma cota de referência, usualmente coincidente com a cota mínima da superfície de inserção) e c_f é um coeficiente de forma que, em média, assume valores da ordem de 15 a 20% do valor máximo da altura de água (valor máximo de h). O parâmetro c_f pode ser calibrado a partir do cálculo efetuado com o MEF. Em geral, na interpretação de deslocamentos com este tipo de expressões (incluídas em modelos de separação de efeitos), adotam-se para c_f valores menores no caso de pontos da obra pertencentes a secções em que a cota da inserção é significativamente superior à cota de referência para cálculo da altura da água (em geral coincidente com a cota mínima da inserção).

Na Figura 2.14 apresenta-se uma comparação entre a forma de três curvas correspondentes à expressão anterior, considerando três valores de c_f para o caso de uma barragem de 100 m de altura e considerando um deslocamento máximo devido à pressão hidrostática de 50 mm (este valor deve ser obtido com base no ajuste do parâmetro “ a ”). Veja-se que na Figura 2.14, para menores valores de c_f a curvatura da linha representativa do efeito do nível é mais acentuada.

EFEITO ELÁSTICO DO NÍVEL

UTILIZAÇÃO DE EXPRESSÕES ENVOLVENDO A FUNÇÃO EXPONENCIAL.

$$u_H(h) = a(e^{h/c_f} - 1)$$

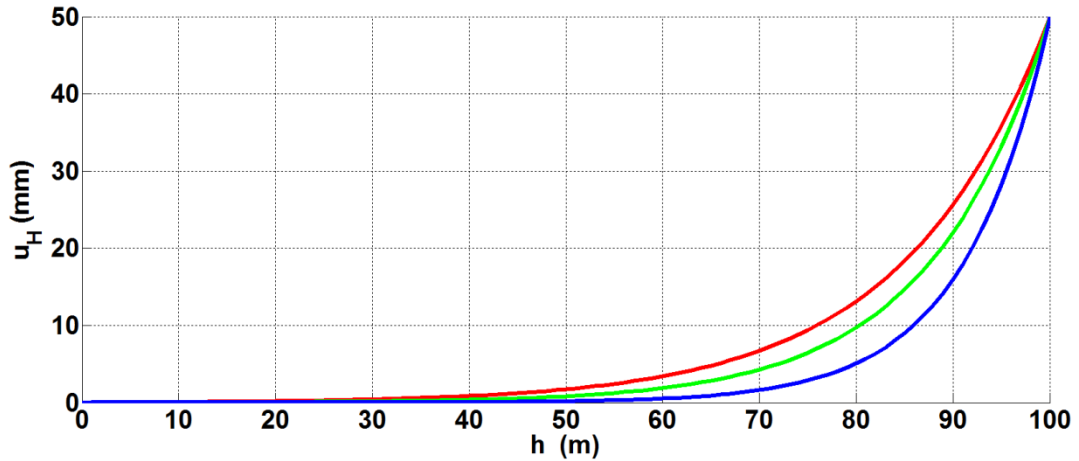


Figura 2.14 – Curvas representativas do efeito elástico do nível usando expressões do tipo $u_H(h) = a(e^{h/c_f} - 1)$. Comparação para três valores distintos do coeficiente de forma: $c_f = 15$ (vermelho), $c_f = 12.22$ (verde) e $c_f = 8.75$ (azul).

Quanto à representação do efeito do nível apresenta-se na Figura 2.15 uma comparação entre uma curva polinomial $u_H(h) = a_3 h^3$ (preto) e uma curva exponencial $u_H(h) = a(e^{h/15} - 1)$ (vermelho).

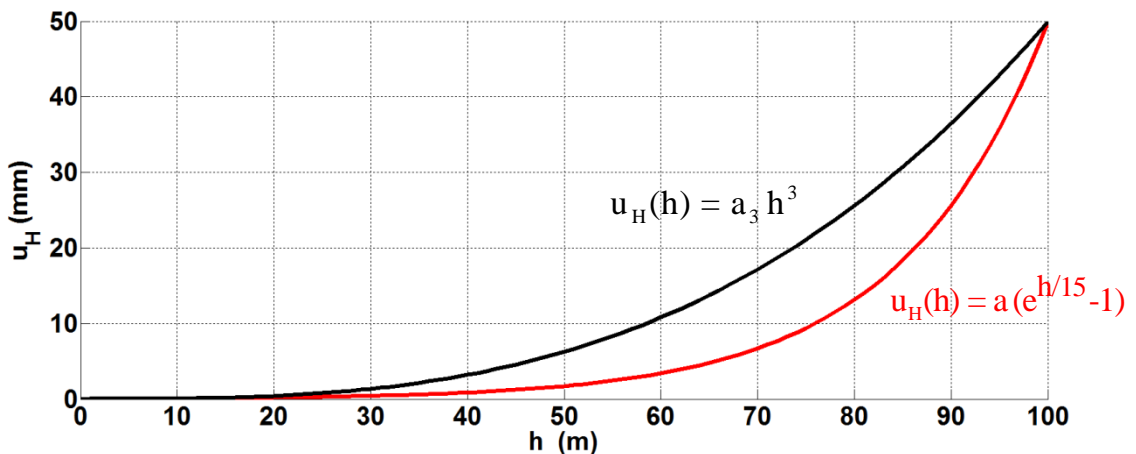


Figura 2.15 – Comparação de curvas representativas do efeito elástico do nível usando uma expressão polinomial da forma $u_H(h) = a h^3$ a preto, e uma expressão do tipo $u_H(h) = a(e^{h/15} - 1)$ a vermelho.

2.3.1.2 Efeito térmico: $u_T(\bar{t})$

Esta parcela representa o deslocamento associado às variações de temperatura, que têm origem em três componentes:

- i) onda térmica do ar;
- ii) onda térmica da água; e
- iii) calor de hidratação

Ao contrário do que acontece com o calor de hidratação, as ondas térmicas do ar e da água apresentam, ao longo do tempo, uma variação sinusoidal da sua amplitude. No caso da barragem da Aguieira, acerca da qual se realiza o trabalho, que é uma barragem já em fase de exploração há mais de três décadas, já não existe efeito do calor de hidratação, e por isso pode-se considerar que, globalmente, o deslocamento associado às variações de temperatura terá, ao longo do tempo, uma resposta também de forma sinusoidal.

A variável \bar{t} , que representa a época do ano, é usualmente contada em dias a partir do primeiro dia do mês de janeiro. Para a expressão de $u_T(\bar{t})$, a seguinte forma harmónica de período anual é das mais adotadas

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) \quad (\text{Willm \& Beaujoint, 1967}) \quad (2.13)$$

Em alguns casos, sobretudo em climas tropicais, utiliza-se a sobreposição de duas ondas harmónicas, uma de período anual e outra de período semestral

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365,25}\right) + b_3 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{182,625}\right) + b_4 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{182,625}\right) \quad (2.14)$$

A parcela associada às variações térmicas de período anual também pode ser considerada como uma função da temperatura T (°C) medida num ou em vários termómetros instalados em obra, que se considerem representativos. Neste caso adota-se, em geral, uma expressão que traduz uma relação linear entre a grandeza em análise e a temperatura medida

$$u_T(T) = b T \quad (2.15)$$

2.3.1.3 Efeitos do tempo: $u_t(t)$

Esta parcela de deslocamento está associada a outras ações (ação expansiva, por exemplo), devidas ao carácter não reversível do comportamento estrutural e à variação de propriedades estruturais ocorridas no decurso do tempo. A variável tempo, usualmente contada em dias, pode ser medida a partir:

- i) de uma data de referência tomada como origem absoluta do tempo e que pode geralmente coincidir com a época média do período construtivo (t);
- ii) da data de início do primeiro enchimento ($t-t_f$);
- iii) do início do período em análise ($t-t_a$).

É de referir que nos modelos de separação de efeitos mais simples uma das formas usualmente adotadas para a expressão de $u_t(t)$ é do tipo

$$u_t(t) = c_1(t-t_a) + c_2(t-t_a)^2 + d_1 \log\left(1 + \frac{t-t'}{t_a-t'}\right) \quad (2.16)$$

em que a parcela logarítmica é introduzida com o objetivo de captar o carácter viscoelástico da resposta associada a forças aplicadas que se mantenham aproximadamente constantes ao longo do tempo (como é o caso do peso próprio, aplicado à idade $t' = 0$ coincidente com a data média do período construtivo, e como é por vezes o caso da pressão hidrostática, aplicada à idade $t'=t_f$, coincidente com a data média do 1º enchimento) e a parcela $c_1(t-t_a) + c_2(t-t_a)^2$ pretende captar outros efeitos de tempo desde o início do período em análise ($t = t_a$).

Os efeitos do tempo $u_t(t)$ podem também ser enquadrados por expressões envolvendo funções exponenciais com vista a captar o efeito de ações expansivas

$$u_t(t) = c_1(t-t_a) + c_2(t-t_a)^2 + d_1 \log\left(1 + \frac{t-t'}{t_a-t'}\right) + d_2 \left(e^{-\frac{t_a^n}{\beta}} - e^{-\frac{t^n}{\beta}} \right) \quad (2.17)$$

e para representar uma ação expansiva que atinge metade do seu efeito total ao fim de t_{hs} ⁽⁴⁾ dias, adota-se $n=3,258$ e $\beta = t_{hs}^n \cdot n / (n-1)$. Estes valores de n e β são determinados quando se admite que o ponto de inflexão do efeito da ação expansiva $t = t_{inf}$ (ver Figura 2.13) coincide com o ponto em que a expansão atinge metade do seu efeito total ($t = t_{inf} = t_{hs}$). Neste ponto a segunda derivada em ordem a t do termo exponencial é nula, ou seja, admitindo que o período em análise coincide com a origem do eixo do tempo $t_a = 0$, pode-se escrever

⁴ Do inglês “half swelling” (metade do efeito expansivo total)

$$\left(1 - e^{-\frac{t^n}{\beta}}\right)^n = 0 \Leftrightarrow \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad (2.18)$$

Assim a partir da condição que traduz a hipótese de que metade do efeito expansivo total ocorre no ponto de inflexão obtém-se o valor de n atrás referido

$$f(t=t_{inf}=t_{hs})=0,5 \Leftrightarrow 1 - e^{-\frac{n-1}{n}} = 0,5 \Leftrightarrow n=3,258 \quad (2.19)$$

Na Figura 2.16 apresenta-se a curva do tipo sigmóide utilizada para representar a parcela do efeito do tempo usando uma expressão da forma $u_t(t) = c \cdot (1 - e^{-t^n/\beta})$, com $n=3,258$, $t_{hs} = 7000$ dias, $\beta = t_{hs}^n \cdot n / (n-1)$ e $c = 15$ mm. Este tipo de expressões são utilizadas, como se referiu, para captar o efeito de ações expansivas que, frequentemente apresentam uma evolução ao longo do tempo caracterizada por uma taxa de crescimento com tendência para aumentar na fase inicial e, posteriormente, tender a estabilizar (o que caracteriza a curva do tipo sigmóide).

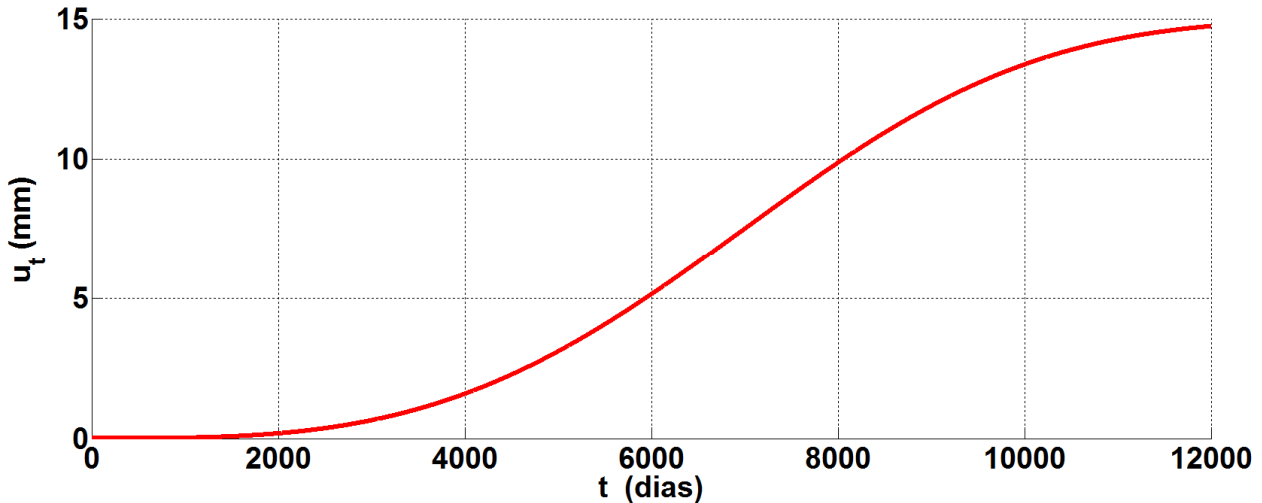


Figura 2.16 – Curva do tipo sigmóide, representativa do efeito do tempo usando uma expressão da forma $u_t(t) = c \left(1 - e^{-t^n/\beta}\right)$.

2.3.1.4 Termo independente: k

Este termo representa uma constante que é introduzida, em parte, devido ao facto de os valores observados corresponderem a valores relativos das grandezas em análise; esta constante resulta do facto de, no caso geral, não serem coincidentes as datas correspondentes aos zeros das diferentes parcelas e de não serem coincidentes as datas da época e_0 , da origem das observações (em que os valores observados são inicializados com valores nulos), e da época e_a , de início do período em análise. Para ilustrar este comentário é conveniente reparar na expressão que permite exprimir a constante k em função do valor observado $u_{obs.e_a}$, na época e_a de início do período em análise ($t = t_a$), a qual pode ser escrita como $k = u_{obs.e_a} - (u_H(h_a) + u_T(\bar{t}_a) + r_a)$ quando se adota a notação introduzida no parágrafo seguinte (note-se que, nesta época e_a os efeitos do tempo correspondentes ao período em análise são inicializados com o valor nulo: $u_i(t_a) = 0$).

Em cada época de observação, e , caracterizada por $h = h_e$, $\bar{t} = \bar{t}_e$ e $t = t_e$, a componente de deslocamento observado, $u_{obs} = u_{obs}(h_e, \bar{t}_e, t_e)$, coincidirá com o deslocamento calculado pelo modelo na mesma época $u_{mod} = u_{mod}(h_e, \bar{t}_e, t_e)$ a menos de um resíduo r_e decorrente do ajuste estatístico da expressão do modelo aos valores observados nas várias épocas

$$u_{obs} = u_M + r_e \quad (2.20)$$

Os parâmetros das funções parcelares do modelo (por exemplo: a_1 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 e k) são determinados quando disponíveis os dados de um número N suficientemente grande de observações (em relação ao número de parâmetros a determinar), por resolução das N equações correspondentes, de acordo com o critério de Gauss de minimização da soma dos quadrados dos resíduos. Os parâmetros determinados serão válidos para o domínio de variação das variáveis associadas às ações nas N observações utilizadas. A fiabilidade do modelo pressupõe ainda que não haja correlação na evolução das variáveis que afetam efeitos parcelares distintos.

2.3.2 **Cálculo dos parâmetros do modelo pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)**

Os valores dos n parâmetros destes modelos de interpretação quantitativa (p.ex. num modelo de $n=7$ parâmetros, pode-se usar a notação: $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, k$) que melhor se ajustam ao conjunto das N épocas de observação são determinados por resolução de um sistema de N equações com n incógnitas (o número de equações N deverá ser, de preferência, significativamente superior ao número de parâmetros n a identificar) pelo critério de Gauss de minimização da soma dos quadrados dos resíduos r_i (Método dos Mínimos Quadrados).

Assim para o referido exemplo com $n=7$ pode-se ter um sistema como o seguinte:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\text{obs}(e1)} = a_1 h_{e1}^4 + a_2 h_{e1}^3 + b_1 \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e1}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e1}}{365.25}\right) + c_1 t_{e1}^2 + c_2 t_{e1} + k \\ \mathbf{u}_{\text{obs}(e2)} = a_1 h_{e2}^4 + a_2 h_{e2}^3 + b_1 \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e2}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e2}}{365.25}\right) + c_1 t_{e2}^2 + c_2 t_{e2} + k \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{\text{obs}(eN)} = a_1 h_{eN}^4 + a_2 h_{eN}^3 + b_1 \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{eN}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{eN}}{365.25}\right) + c_1 t_{eN}^2 + c_2 t_{eN} + k \end{cases} \quad (2.21)$$

ou, matricialmente

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{obs}(e1)} \\ \mathbf{u}_{\text{obs}(e2)} \\ \mathbf{u}_{\text{obs}(e3)} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{\text{obs}(eN)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{e1}^4 & h_{e1}^3 & \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e1}}{365.25}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e1}}{365.25}\right) & t_{e1}^2 & t_{e1} & 1 \\ h_{e2}^4 & h_{e2}^3 & \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e2}}{365.25}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{e2}}{365.25}\right) & t_{e2}^2 & t_{e2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{eN}^4 & h_{eN}^3 & \cos\left(\frac{2\pi \bar{t}_{eN}}{365.25}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \bar{t}_{eN}}{365.25}\right) & t_{eN}^2 & t_{eN} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ c_1 \\ c_2 \\ k \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

que, pode ser escrito na seguinte forma mais compacta

$$\underline{\mathbf{u}}_{\text{obs}} = \underline{\mathbf{M}} \underline{\mathbf{x}} \quad (2.23)$$

em que $\underline{\mathbf{x}}$ é o vetor com os $\mathbf{n}=7$ parâmetros incógnitos, e a matriz $\underline{\mathbf{M}}$ ($\mathbf{N} \times \mathbf{n}$) contém os coeficientes que dependem dos valores das variáveis h , \bar{t} e t , em cada época de observação.

Assim, de acordo com o MMQ obtém-se

$$\underline{\mathbf{x}} = \left(\underline{\mathbf{M}}^T \underline{\mathbf{M}} \right)^{-1} \underline{\mathbf{M}}^T \underline{\mathbf{u}}_{\text{obs}} \quad (2.24)$$

Na Figura 2.17 apresenta-se, a título de exemplo, o resultado da aplicação do modelo de separação de efeitos aplicado à análise do deslocamento radial observado por geodesia no fecho da abóbada direita da barragem da Aguieira (**DamSafe1.0**).

Na utilização deste tipo de modelos de interpretação das observações é fundamental conhecer os limites ou a dimensão do respetivo domínio de validade e ainda a forma como esse domínio está preenchido (em termos de uniformidade e de densidade) o qual é definido pelos valores assumidos pelas variáveis principais h , \bar{t} e t .

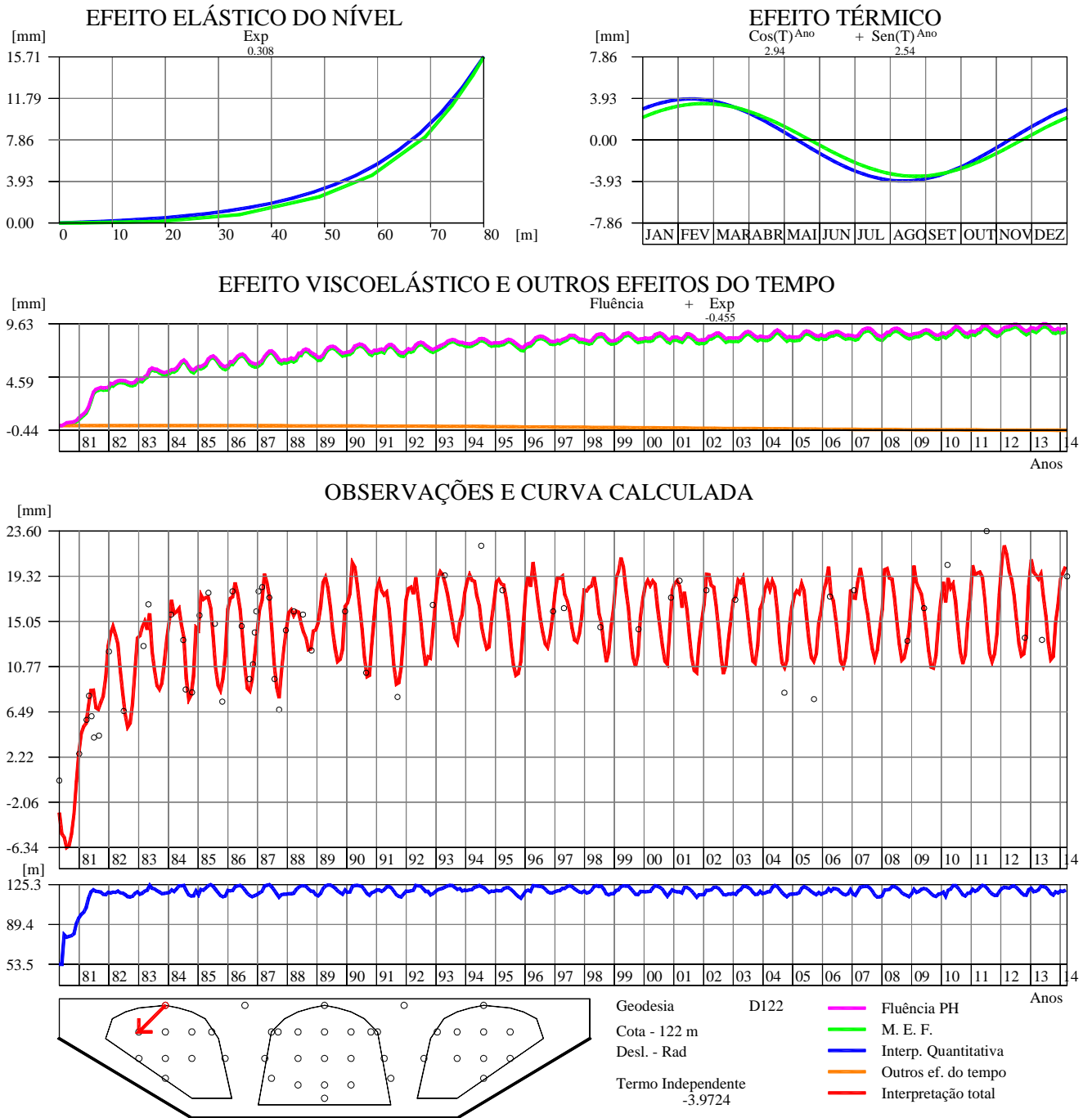


Figura 2.17 – Modelo de separação de efeitos aplicado à análise do deslocamento radial observado por geodesia no fecho da abóbada direita da barragem da Aguieira (**DamSafe1.0**).

2.3.3 Modelos com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática

Os modelos de separação de efeitos descritos anteriormente não permitem a separação dos efeitos do tempo nas várias parcelas pretendidas quando, como é comum, existem vários efeitos do tempo em simultâneo como, por exemplo, deslocamentos devidos a fluência associada à pressão hidrostática e deslocamentos devidos a expansões. A utilização de uma parcela logarítmica e de uma exponencial como as descritas em (2.17), ambas dependentes da variável tempo e independentes da evolução do nível da água, não permite em geral, obter de forma adequada a pretendida separação dos efeitos dos dois fenómenos referidos. É de referir que a fluência e as expansões provocam, frequentemente, deslocamentos em direções opostas e, por isso, em muitos casos mascaram-se mutuamente.

Uma das parcelas de tempo que pode ser convenientemente separada dos restantes efeitos de tempo é precisamente a parcela da fluência associada à pressão hidrostática, pois trata-se de uma parcela que tem uma conhecida dependência da evolução do nível de água na albufeira, para além da conhecida dependência da variável tempo. Assim, na generalidade dos casos em que a função de fluência é conhecida de forma aproximada, torna-se possível formular um novo tipo de modelos de interpretação quantitativa que incorporem o conhecimento da correlação física existente entre as parcelas elástica e diferida associadas às variações do nível da água na albufeira $h(t)$.

Neste novo tipo de modelos de interpretação quantitativa, é necessário recorrer à discretização do diagrama de evolução do nível de água ao longo do tempo, $h(t)$, numa sucessão de p patamares carga, de amplitude $\Delta h_j = h_j - h_{j-1}$ (Figura 2.18), aplicados à idade t'_j , ou seja

$$h(t) = \sum_{j=1}^p \Delta h_j \quad (2.25)$$

e à aplicação do princípio da sobreposição de efeitos, para obter a seguinte expressão que representa, em parcelas distintas, o efeito elástico instantâneo da pressão hidrostática (para o caso $u_H(h) = ah^4$) e o correspondente efeito de fluência, expressa através do já referido somatório para os diversos patamares

$$u_H(h, t) = a \left[h^4 + \sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) \Delta h_j^4 - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) \Delta h_j^4 \right] \quad (2.26)$$

em que $\phi(t, t') = E(t)J(t, t') - 1$, é o coeficiente de fluência, sendo $J(t, t')$ a função de fluência do betão da barragem (note-se que, considerando por exemplo $u_H(h) = ah^4$, então para um dado patamar j escreve-se $\Delta h_j^4 = h_j^4 - h_{j-1}^4$).

Com modelos de separação de efeitos baseados neste tipo de formulação é possível obter, em geral, uma adequada separação da fluência associada à pressão hidrostática dos restantes efeitos de tempo, nomeadamente dos efeitos das expansões.

Assim, para obter um novo modelo para descrever adequadamente a evolução do deslocamento total $u = u(h, \bar{t}, t)$, há que adicionar à expressão (2.26) que descreve os efeitos instantâneo e diferido (fluência) associados às variações do nível da água $h(t)$, a expressão $u_T(\bar{t})$ que descreve o efeito associado às variações térmicas (2.13), e ainda uma expressão que permita descrever os vários efeitos de tempo $u_t(t)$ referidos no parágrafo anterior, a qual poderá ser um caso particular da forma geral apresentada em (2.17), resultando um novo modelo de regressão

$$u = a [H(h) + F(t, t_a, H(h))] + u_T(\bar{t}) + u_t(t) + k \quad (2.27)$$

em que se poderá ter, por exemplo,

$$H(h) = h^4 \quad \text{ou} \quad H(h) = \left(e^{h/c_f} - 1 \right) \quad e \quad (2.28)$$

$$F(t, t_a, H(h)) = \sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) \Delta H_j - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) \Delta H_j$$

sendo $\Delta H_j = H(h_j) - H(h_{j-1})$.

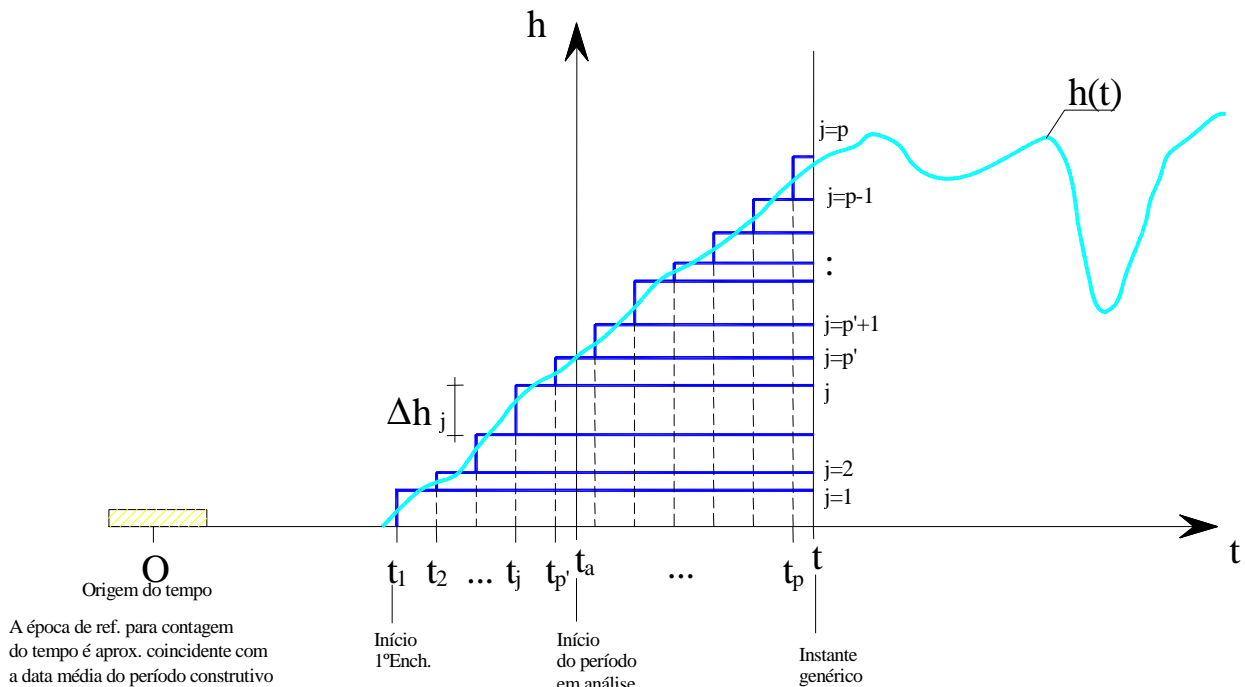


Figura 2.18 – Discretização do nível da albufeira em patamares como é exigido pela formulação de modelos de interpretação quantitativa, com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática.

2.3.4 Vantagens da utilização de modelos com consideração explícita da resposta viscoelástica associada à pressão hidrostática

A utilização dos tradicionais modelos de interpretação quantitativa na análise do comportamento de barragens em fase de exploração apenas permite identificar o efeito elástico instantâneo das duas principais ações (a pressão hidrostática e as variações térmicas ambientais) e os restantes efeitos não elásticos (viscoelásticos, lineares ou não lineares) são remetidos para uma única parcela denominada efeitos de tempo, que afinal é, na prática, a parcela cuja análise condiciona de forma determinante as avaliações que se efetuam periodicamente às condições de funcionalidade e de segurança das obras.

$$u = \underbrace{a_4 h^4}_{\text{Efeito elástico inst. do nível da água}} + \underbrace{b_1 \cos \frac{2 \pi \bar{t}}{365} + b_2 \sin \frac{2 \pi \bar{t}}{365}}_{\text{Efeito da onda térmica anual}} + \underbrace{c_2 \bar{t}^2 + c_1 \bar{t}}_{\text{Efeitos do tempo}} + k \quad (2.29)$$

Fluência PH
 Fluência pp
 Expansões
 Mov. fundação

Desta forma, na parcela dos efeitos do tempo ficam sobrepostos os efeitos viscoelásticos lineares (que geralmente são efeitos normais, perfeitamente aceitáveis) com efeitos que podem revelar fenómenos anómalos, ou inicialmente não previstos, tais como ações expansivas ou movimentos de fundação.

A grande vantagem do novo tipo de modelos de interpretação quantitativa, agora disponíveis no **DamSafe1.0**, é que, ao permitirem separar os efeitos viscoelásticos associados à pressão hidrostática dos restantes efeitos de tempo, constituem uma ferramenta que facilita a análise detalhada da parcela dos efeitos de tempo.

Para ilustrar de forma esquemática o interesse deste novo tipo de modelos de interpretação quantitativa apresenta-se esquematicamente na Figura 2.19 um caso típico relativo à análise da evolução ao longo do tempo do deslocamento horizontal num ponto no topo de uma barragem abóbada sujeita a uma ação expansiva (Gomes J. C., 2007) o qual, como se pode constatar pela análise da figura, só pode ser objeto de uma correta interpretação quantitativa baseada no novo tipo de modelos.

Um outro exemplo é apresentado esquematicamente na Figura 2.20 correspondendo também um caso típico relativo à análise da evolução ao longo do tempo do deslocamento vertical num ponto do coroamento de uma barragem abóbada em que se sabe à partida que não existem reações expansivas de origem interna, pelo que os efeitos do tempo presentes correspondem apenas à parcela de fluência associada à pressão hidrostática e à parcela de fluência associada à ação constante do peso próprio. Com o novo tipo de modelos de interpretação quantitativa disponíveis no **DamSafe1.0** é possível separar adequadamente estas duas parcelas utilizando um termo logarítmico para captar o carácter viscoelástico da resposta de fluência à ação do peso próprio (força constante ao longo do tempo após a construção).

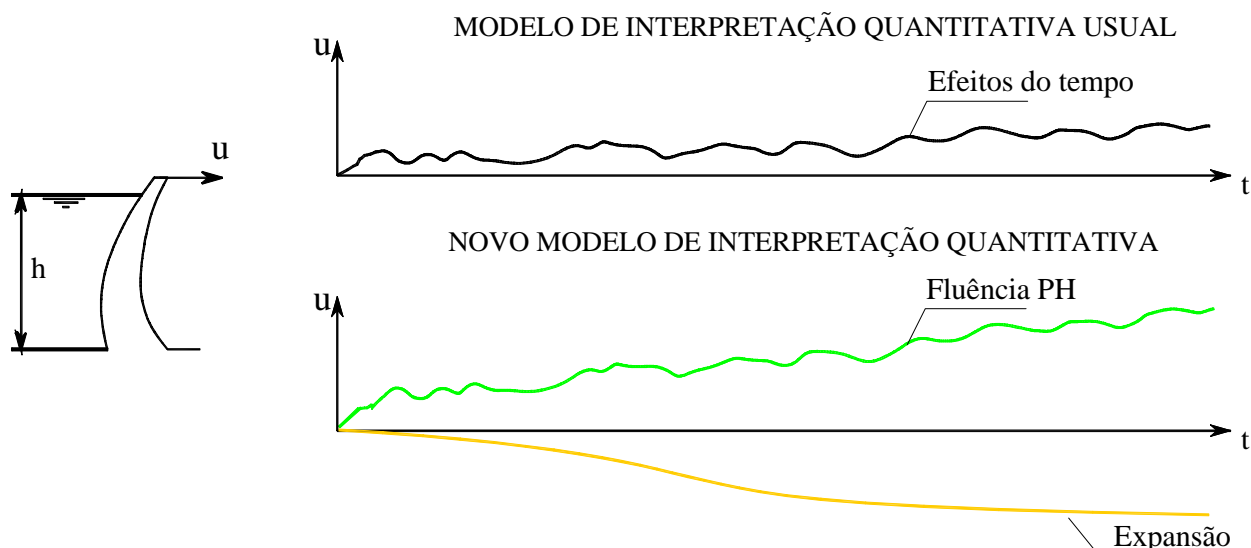


Figura 2.19 – Análise (MSE) do deslocamento radial do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada sujeita a um processo expansivo. Nota: para barragens de abóbadas múltiplas com contrafortes os deslocamentos ao longo do tempo devidos à expansão podem ser para jusante.

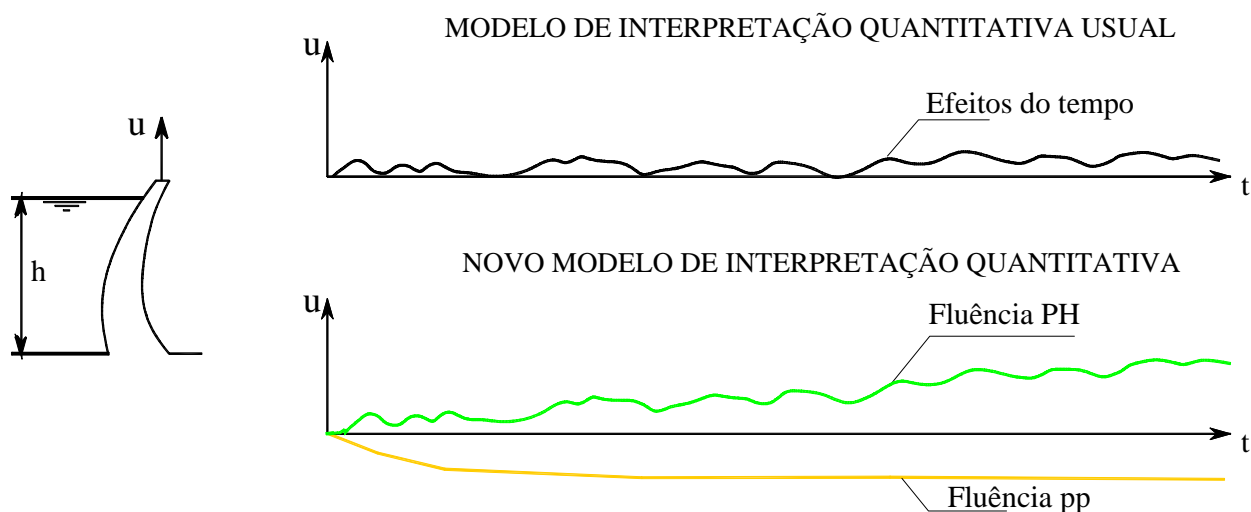


Figura 2.20 – Interpretação quantitativa do deslocamento vertical do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada em que não existem reações expansivas.

Para ilustrar de forma esquemática o interesse deste novo tipo de modelos de interpretação quantitativa apresenta-se esquematicamente na Figura 2.21 um caso típico relativo à análise da evolução ao longo do tempo do deslocamento vertical num ponto do coroamento de uma barragem abóbada sujeita a uma ação expansiva o qual, como se pode constatar pela análise da figura, só pode ser objeto de uma correta interpretação quantitativa com base neste novo tipo de modelos e recorrendo simultaneamente à utilização de resultados obtidos numericamente por intermédio de um modelo de elementos finitos.

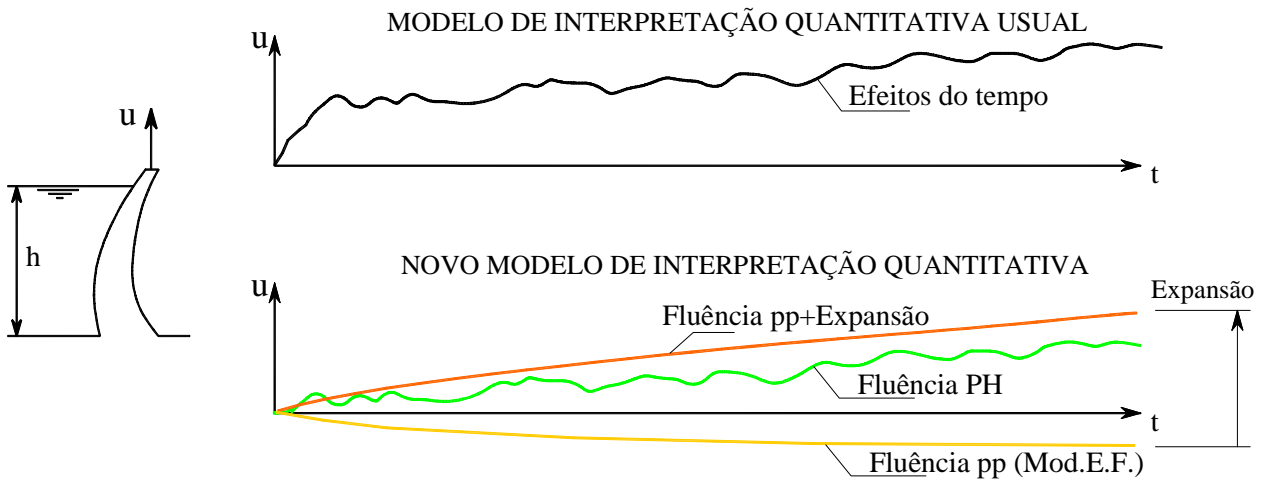


Figura 2.21 – Interpretação quantitativa do deslocamento vertical do ponto superior da consola central de uma barragem abóbada em que existem reações expansivas.

Por fim importa referir que no controlo da segurança é fundamental dispor de programas como o **DamSafe1.0**, que permitam a obtenção de gráficos que mostram a comparação entre os resultados observados, devidamente analisados com base em modelos de separação de efeitos, e resultados de modelos numéricos de elementos finitos (Figura 2.22).

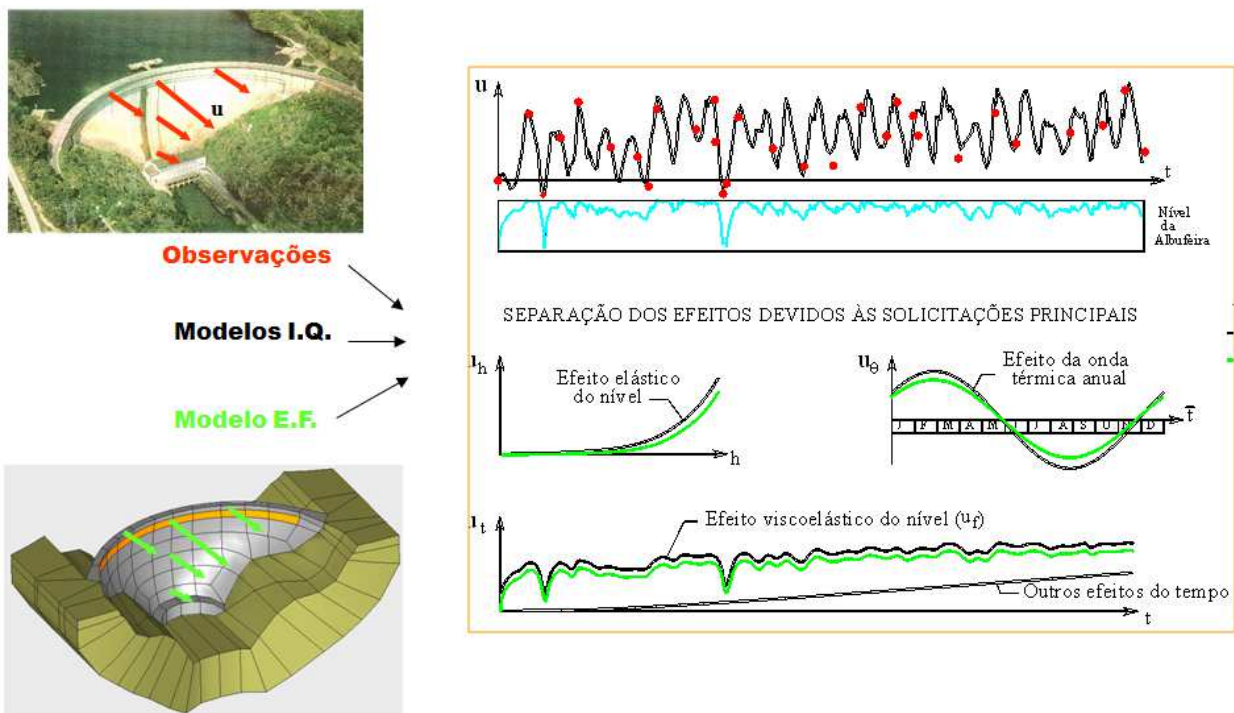


Figura 2.22 – Utilização integrada de resultados da observação (em cima à esquerda), modelos numéricos de elementos finitos (em baixo, à esquerda) e de modelos de interpretação quantitativa (formulação).

2.4 Considerações finais

Neste capítulo salientou-se que o controlo da segurança de barragens de betão em fase de exploração deve ser baseado na análise de resultados observados, recorrendo à utilização integrada de dois tipos de modelos: modelos numéricos de elementos finitos (MEF) e modelos de separação de efeitos (MSE). Este tipo de análise deve ser efetuada com base em *software* como o **DamSafe1.0** preparado para analisar as séries temporais observadas, com recurso aos referidos MSE, e ainda preparado para comparar os resultados da observação com resultados numéricos de MEF, previamente calibrados.

Neste capítulo apresentaram-se os fundamentos da mecânica estrutural e os fundamentos do método dos elementos finitos na perspetiva da sua implementação computacional para análise de barragens de betão.

Apresentaram-se os fundamentos dos modelos de separação de efeitos referindo que os MSE que foram desenvolvidos originalmente, não permitiam efetuar a separação de efeitos do tempo nas várias parcelas pretendidas quando existem vários efeitos do tempo em simultâneo como, por exemplo, deslocamentos devidos a fluência associada à pressão hidrostática e deslocamentos devidos a expansões. Neste capítulo mostrou-se que uma das parcelas de tempo que pode ser convenientemente separada dos restantes efeitos do tempo é precisamente a correspondente à fluência associada à pressão hidrostática, pois trata-se de uma parcela que tem uma conhecida dependência da evolução do nível de água na albufeira, para além da conhecida dependência da variável tempo. Com um MSE baseado neste tipo de formulação é possível obter, em geral, uma adequada separação da fluência associada à pressão hidrostática dos restantes efeitos de tempo, nomeadamente dos efeitos das expansões, e com o novo tipo de modelos utilizados no **DamSafe1.0**, é possível separar adequadamente estas duas parcelas utilizando um termo logarítmico para captar o carácter viscoelástico da resposta de fluência da ação do peso próprio.

3

DamSafe1.0. Programa em MATLAB para Análise do Comportamento Estrutural de Barragens de Betão

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se o programa **DamSafe1.0**, desenvolvido na plataforma GUIDE do MATLAB, para análise do comportamento de barragens em fase de exploração, recorrendo à utilização integrada de modelos de separação de efeitos (MSE) e de modelos de elementos finitos tridimensionais (MEF3D).

O programa **DamSafe1.0** tem uma interface gráfica concebida para facilitar a escolha interativa dos diversos parâmetros envolvidos na análise do comportamento de barragens em fase de exploração, nomeadamente parâmetros dos MSE e dos MEF3D. Quanto às principais potencialidades do programa salienta-se que permite: i) analisar a evolução ao longo do tempo das grandezas observadas com base em modelos de separação de efeitos (MSE); ii) utilizar modelos de elementos finitos (MEF) para simular o comportamento observado, sob a ação das principais solicitações; iii) comparar as observações e os resultados dos MSE e MEF3D; e iv) a visualização gráfica, no ecrã, das diversas grandezas observadas ao longo do tempo e a exportação dos gráficos obtidos para formato .DXF.

Neste capítulo mostram-se também alguns dos já referidos aspetos inovadores introduzidos no **DamSafe1.0**, nomeadamente ao nível dos MSE: i) possibilidade de separação dos efeitos do tempo numa parcela viscoelástica devida ao efeito do nível (fluência associada à pressão

hidrostática) e numa parcela associada aos restantes efeitos do tempo (p.ex. efeitos associados a expansões); e ii) consideração de funções exponenciais na representação da parcela correspondente ao efeito do nível.

3.2 Apresentação do *software* DamSafe1.0 (MATLAB)

3.2.1 Painel “Início”

O programa DamSafe1.0 tem uma interface gráfica que, à entrada (Figura 3.1) apresenta vários botões para escolha da barragem a analisar: atualmente estão disponíveis dados referentes a onze barragens. Cada botão tem a fotografia da barragem correspondente (ficheiro “.JPG”). Os dados de cada barragem estão guardados em pastas (com o nome da respetiva barragem) pertencentes a uma diretoria geral, designada “c:\BASE_DE_DADOS”. Nesta diretoria, geral existe um ficheiro com o nome “BARRAGENS_Nomes_Códigos.xls” no qual se indica quantas barragens existem na base de dados e quais os respetivos nomes e códigos. Na

Tabela I, indicam-se os principais ficheiros que constituem a base de dados, e na Tabela II os ficheiros de saída, que resultam do processo de cálculo.



Figura 3.1 – Painel de entrada do programa **DamSafe1.0** desenvolvido em MATLAB.

Tabela I - Programa DamSafe1.0. Ficheiros na base dados

Ficheiros	Elementos em cada ficheiro
<p>“BARRAGENS_Nomes_Codigos.xls” (em c:\BASE_DE_DADOS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Código das barragens (Ex. Agueira: 5397) - Altura máxima acima da fundação - Nove valores de cota de água para o desenho da linha de influência da PH
<p>“APARELHOS_Nomes_Codigos.xls” (em c:\BASE_DE_DADOS)</p>	<p>Aparelhos instalados e respetivos códigos: código 1 - fios de prumo; código 18 - nivelamento; código 19 – geodesia; ...</p>
<p>“nome_da_barragem.jpg” (em c:\BASE_DE_DADOS\nome_da_barragem)</p>	<p>Fotografia com a vista da barragem</p>
<p>“nome_da_barragem**.jpg” (em c:\BASE_DE_DADOS\nome_da_barragem)</p>	<p>Desenho com a localização dos aparelhos de um dado tipo **</p>
<p>“#####flu.DAD”</p>	<p>Coeficientes da função de fluência</p>
<p>“ #####fich.9 ”</p>	<p>História de cotas de água da albufeira</p>
<p>“ #####fich.** ”</p>	<p>Valores observados e data das observações</p>
<p>“ #####PHTDIN.DAD ” “ #####PPTDIN.DAD ” “#####VTcosTDIN.DAD” “#####VTsenTDIN.DAD”</p>	<p>Ficheiros com os dados do MEF</p>

Tabela II - Programa DamSafe1.0. Ficheiros de saída

Ficheiros de saída	Elementos em cada ficheiro
<p>“ #####_***_***.DXF”</p>	<p>Ficheiros de desenho em formato DXF com os resultados da análise do MSE e do MEF</p>

No final do painel “Início” encontram-se mais quatro botões designados por “Dados Gerais”, “Interpretação Quantitativa”, “Resultados (IQ)” e “Modelo EF3D”, que permitem aceder aos outros painéis da interface gráfica.

3.2.2 Painel “Dados Gerais”

Na sequência da seleção de uma barragem, surge o menu “Dados Gerais” (Figura 3.2). Este menu contém informação acerca da barragem selecionada, mostrando no canto superior esquerdo uma fotografia aérea da barragem, a identificação da mesma (nome e código) e a altura máxima da estrutura. De seguida, o utilizador pode escolher o tipo de aparelho, assim como os pontos de medição onde pretende visualizar os resultados da observação. Estes apresentam-se após a escolha do tipo aparelho, numa imagem localizada no canto superior direito do painel (saliente-se que o utilizador pode escolher mais do que um ponto de medição). Após a seleção dos pontos de medição pelo utilizador, ficam então disponíveis na parte inferior do painel os gráficos com a evolução, ao longo do tempo, dos deslocamentos totais (bastando selecionar na janela *popup* o ponto pretendido e a direção do deslocamento) e do nível da albufeira para as datas em que existe informação.

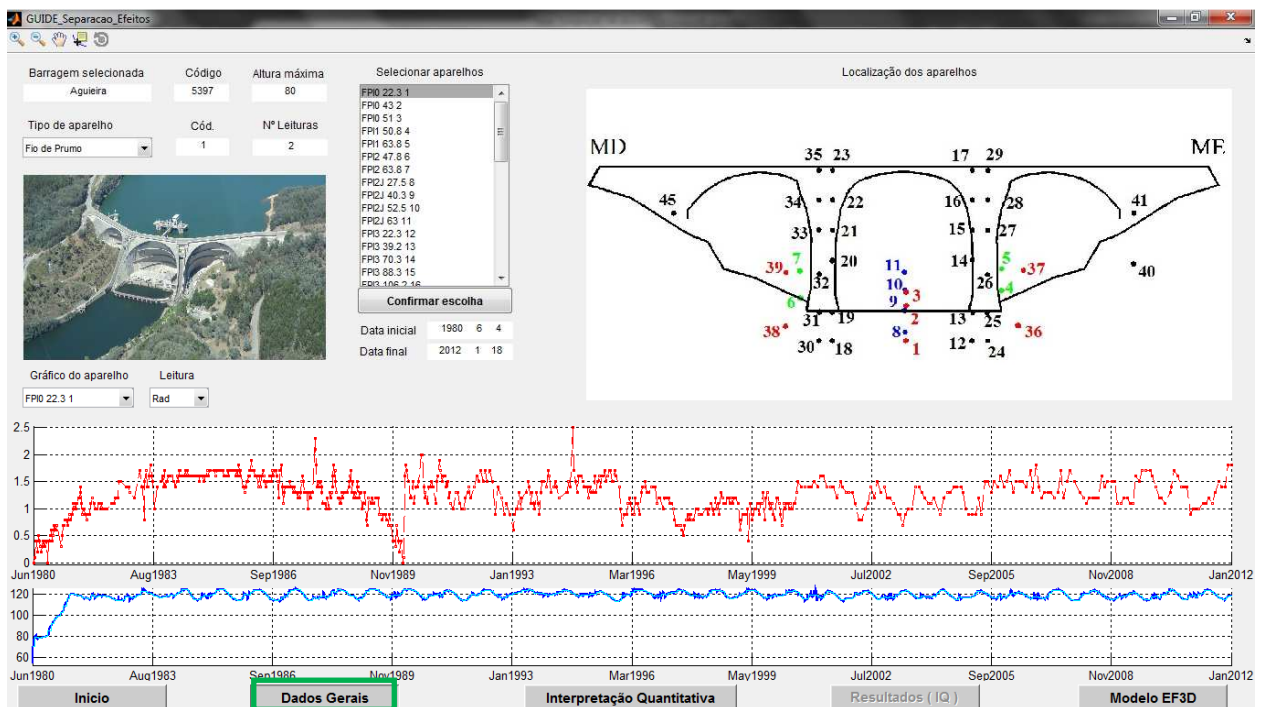


Figura 3.2 – Painel "Dados Gerais" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.

3.2.3 Menu “Interpretação Quantitativa”

Neste painel são escolhidas as funções a adotar no modelo de separação de efeitos (ou modelo de interpretação quantitativa) como se mostra na Figura 3.3. Nomeadamente, neste painel o utilizador escolhe as funções para:

- i) representar o efeito elástico do nível (pressão hidrostática), podendo adotar funções polinomiais (com termos desde h a h^6) ou uma exponencial do tipo $e^{h/c} - 1$;
- ii) representar o efeito das variações de temperatura, podendo adotar ondas de período anual ou semestral ou histórias de temperaturas medidas no interior do betão $T=T(t)$;
- iii) representar os efeitos do tempo, podendo utilizar funções polinomiais com termos do primeiro ao terceiro grau (t a t^3), funções logarítmicas ou funções do tipo sigmóide (geralmente utilizadas para captar o efeito de ações expansivas do betão).

Neste painel está ainda disponível a opção para considerar no MSE a separação da parcela de fluência associada à pressão hidrostática (efeito viscoelástico do nível) e a opção para a comparação dos resultados do MSE com os resultados do MEF.

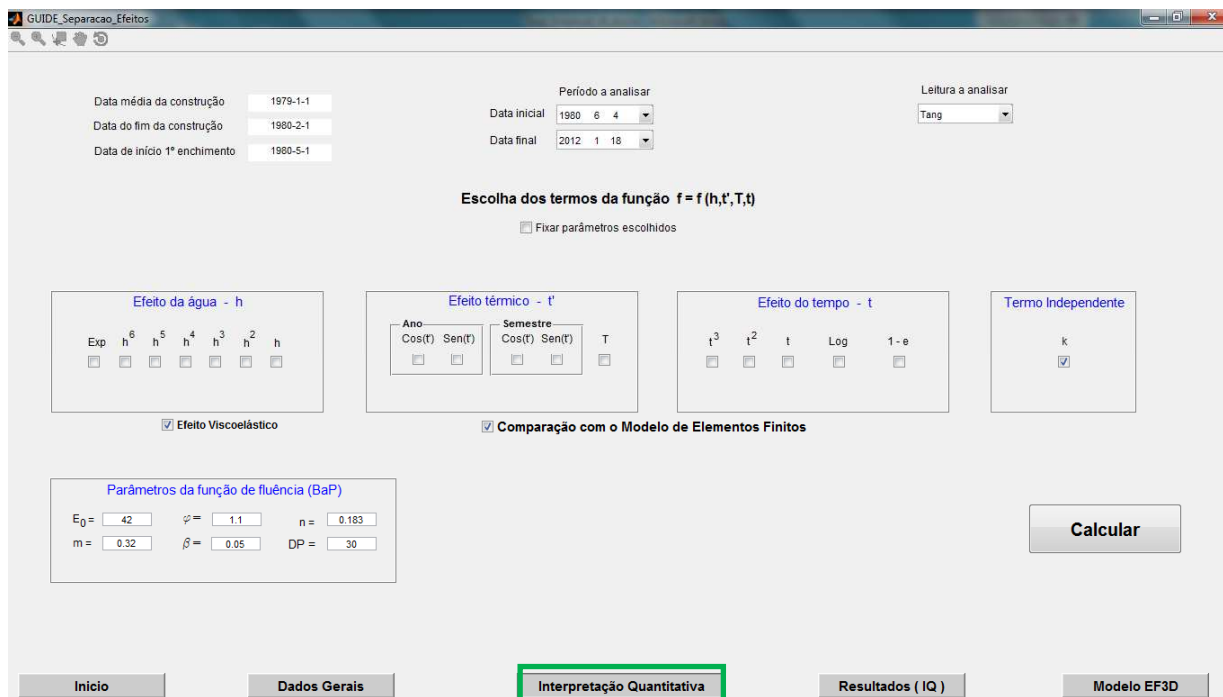


Figura 3.3 – Painel "Interpretação Quantitativa" do programa DamSafe1.0 desenvolvido em MATLAB.

Caso o utilizador opte por considerar no MSE a separação da parcela de fluência associada à pressão hidrostática, surgem no canto inferior esquerdo do painel os parâmetros da função de fluência (incluídos na base dados). Estes valores podem ser alterados pelo utilizador (na base dados de dados mantêm-se sempre os valores originais).

No caso de deslocamentos observados com fios de prumo ou por geodesia o utilizador pode indicar no canto superior direito do painel qual a componente que pretende analisar: radial ou tangencial. O utilizador também pode seleccionar o período de análise no topo do painel. Após a escolha de todos os parâmetros, o utilizador deve pressionar o botão “Calcular” que, após os cálculos, permite o acesso ao próximo painel, para visualização dos resultados.

3.2.4 Painel “Resultados (IQ)”

Para cada uma das grandezas inicialmente escolhidas para análise (no painel “Dados Gerais”), o utilizador pode ver neste painel os resultados (gráficos) dos cálculos com o MSE e com o MEF. Após a escolha da grandeza que se pretende analisar (no canto superior direito é indicada a localização do ponto correspondente à grandeza em análise) os resultados da separação de efeitos, e da comparação MSE/MEF, apresentam-se nos cinco gráficos seguintes (ver Figura 3.4):

- linha de influência do efeito elástico do nível de água (comparação MSE/MEF);
- linha de influência do efeito térmico (comparação MSE/MEF);
- Efeitos do tempo: fluência associada à PH (comparação MSE/MEF) e outros efeitos do tempo (MSE);
- Valores observados nas várias épocas e curva correspondente ao ajuste com o MSE;
- Evolução do nível de água da albufeira ao longo do tempo;

Por fim, com o botão ACAD (canto inferior direito) o utilizador pode optar por gerar ficheiros em formato .DXF (ACAD) com os resultados correspondentes aos gráficos anteriores.

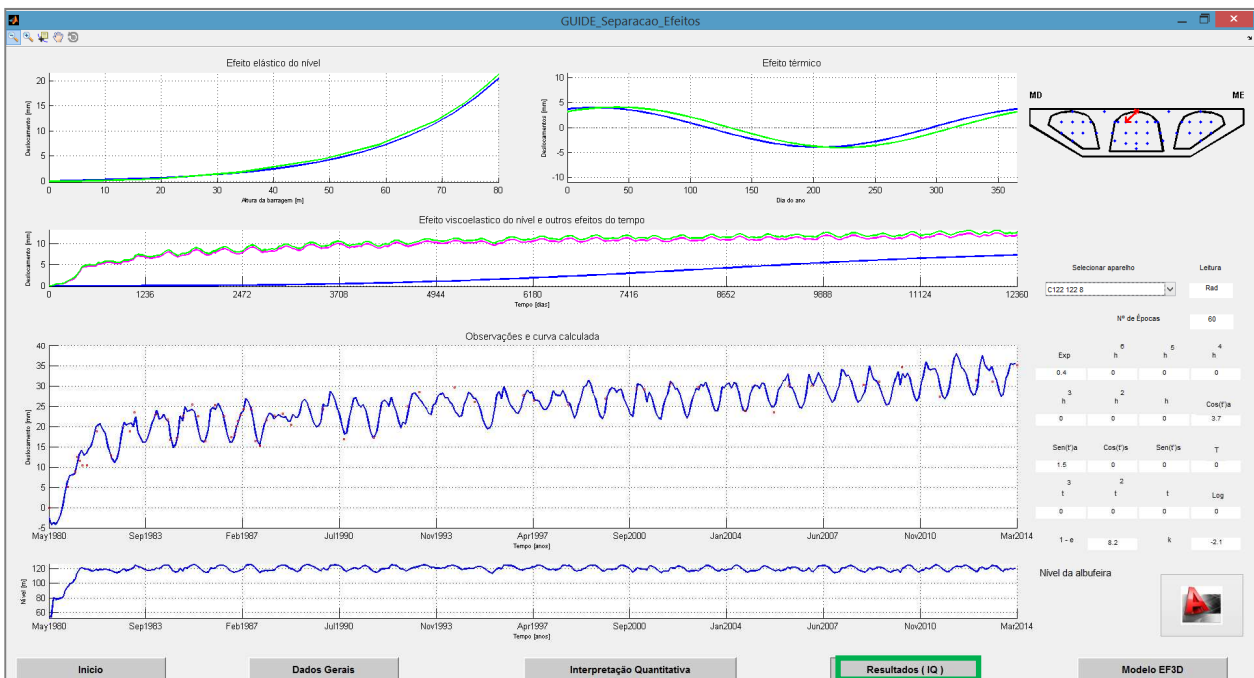


Figura 3.4 – Painel "Resultados (IQ)" do programa **DamSafe1.0** desenvolvido em MATLAB.

3.2.5 Painel “Modelo EF3D”

No painel “Modelo EF3D” (Figura 3.5) o utilizador pode efetuar cálculos com o MEF3D (malha de elementos finitos indicada no canto superior esquerdo) e pode analisar os resultados em termos de deslocamentos e de tensões principais, para várias combinações envolvendo as principais ações: peso próprio, pressão hidrostática (para várias cotas de água) e variações de temperatura. Este painel apresenta os valores considerados para o módulo de elasticidade do betão e das diferentes zonas de fundação (valores da base dados), sendo possível ao utilizador efetuar testes com valores diferentes dos originais (na base de dados mantêm-se sempre os valores originais). Os botões *zoom* que estão associados aos gráficos dos campos de deslocamento e de tensões possibilitam a visualização dos resultados em janelas “flutuantes”, para uma melhor visualização.

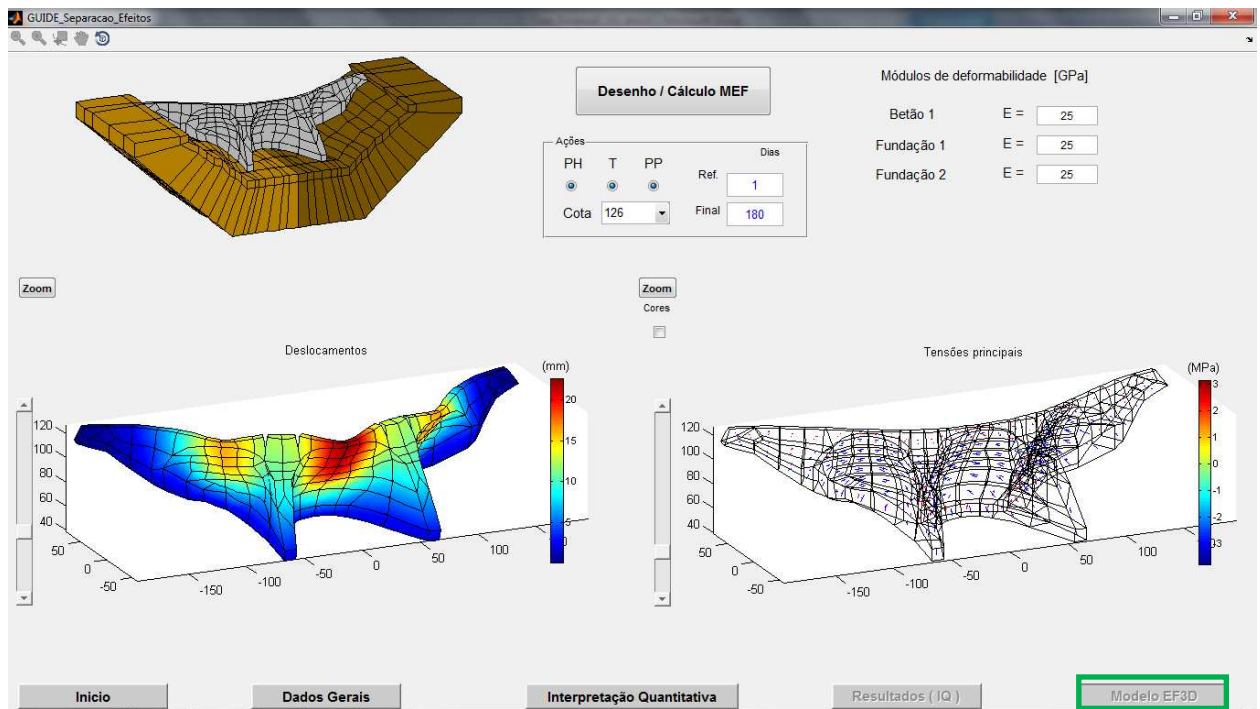


Figura 3.5 – Menu "Modelo EF3D" do programa **DamSafe1.0** desenvolvido em MATLAB.

Na Figura 3.6 à Figura 3.13 mostram-se, para o caso da barragem da Aguieira, os campos de deslocamentos e de tensões considerando diferentes combinações de ações.

Campo de deslocamentos

- Devido à pressão hidrostática (cota 126 m)

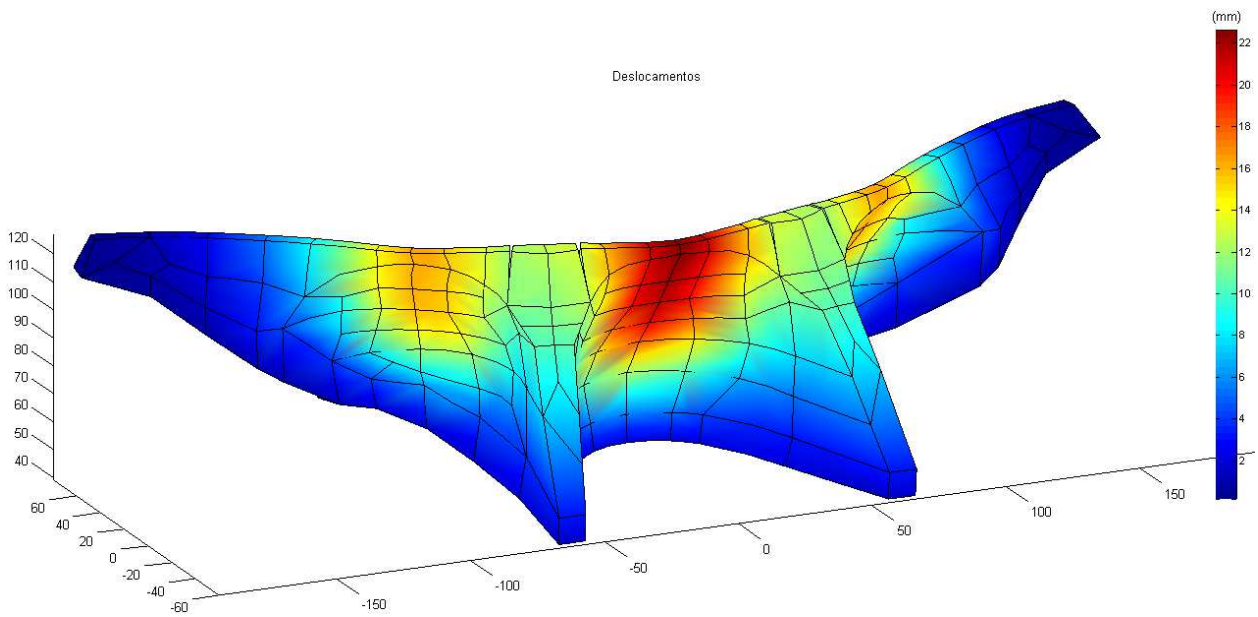


Figura 3.6 – Campo de deslocamentos, devido à pressão hidrostática (cota 126 m).

- Devido à variação da temperatura (aquecimento)

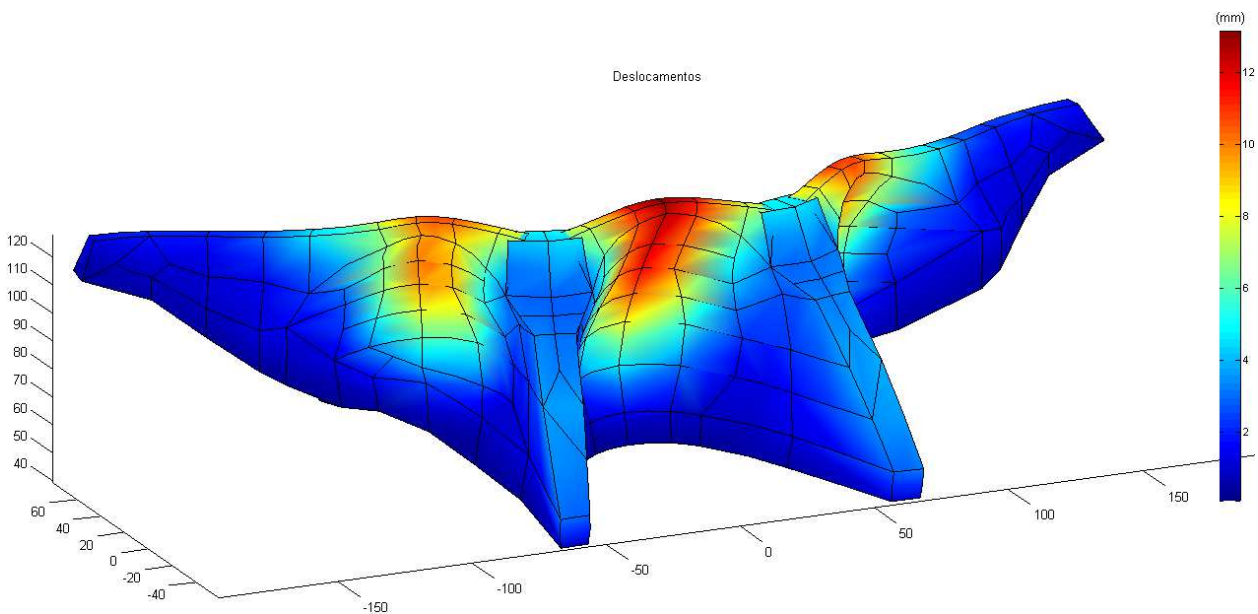


Figura 3.7 – Campo de deslocamentos, devido a um aquecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual.

- Devido ao peso próprio

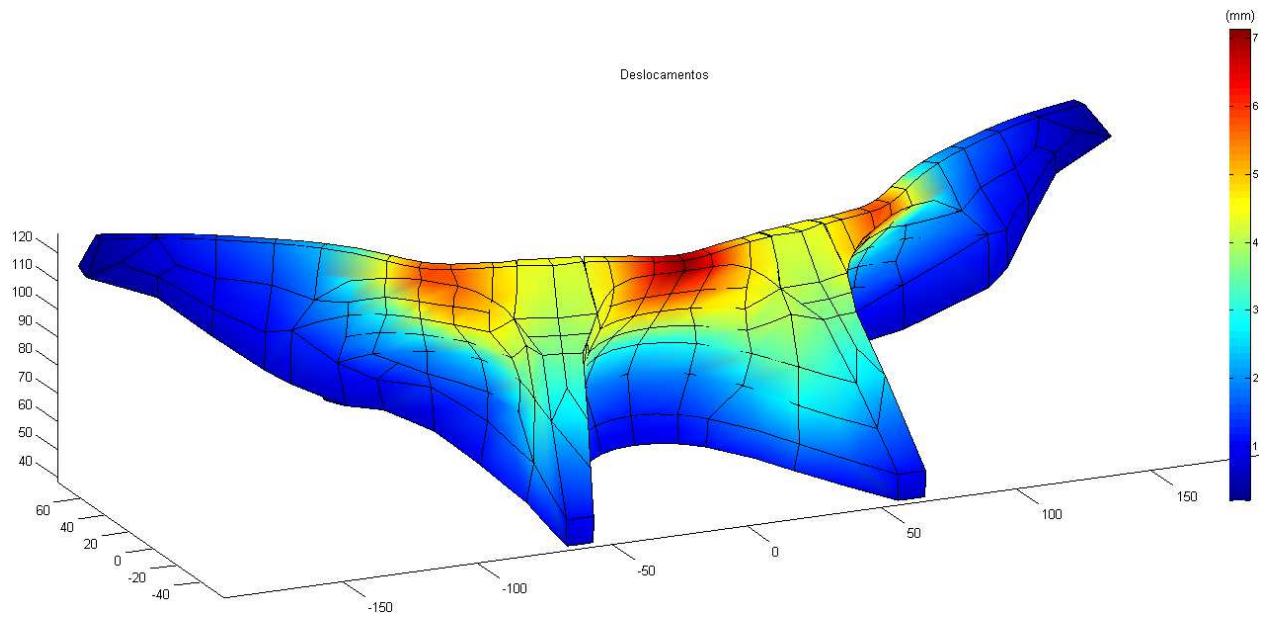


Figura 3.8 – Campo de deslocamentos, devido ao peso próprio.

- Devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio

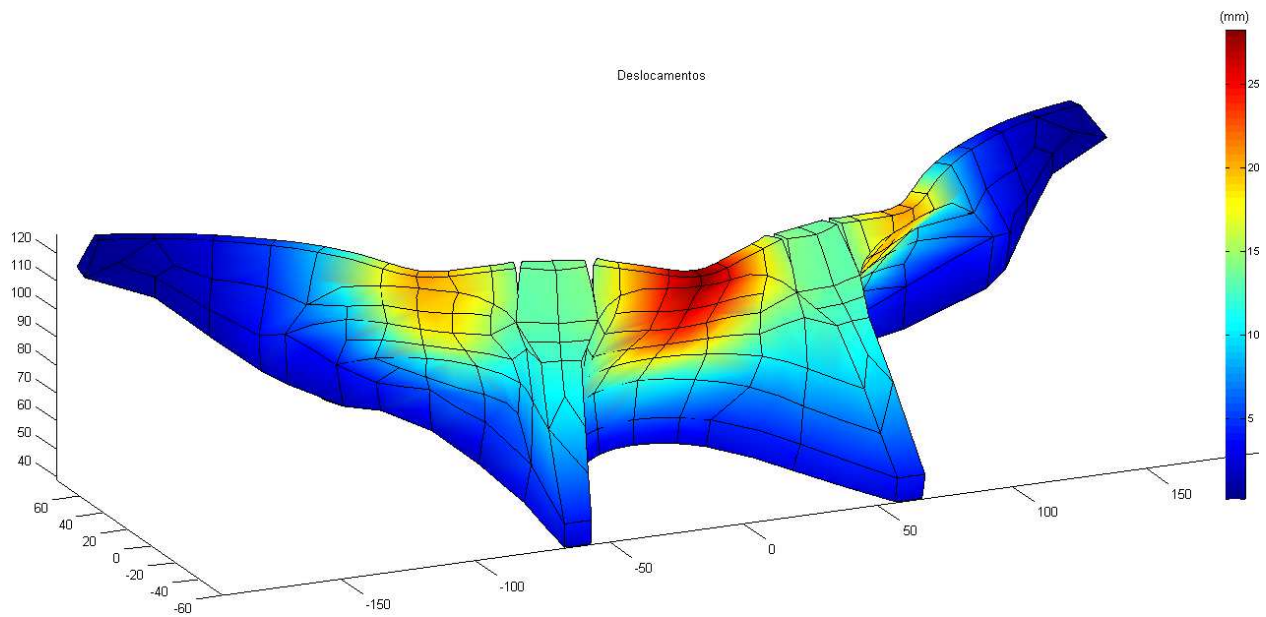


Figura 3.9 – Campo de deslocamentos, devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio.

Campo de tensões

- Devido à pressão hidrostática (cota 126 m)

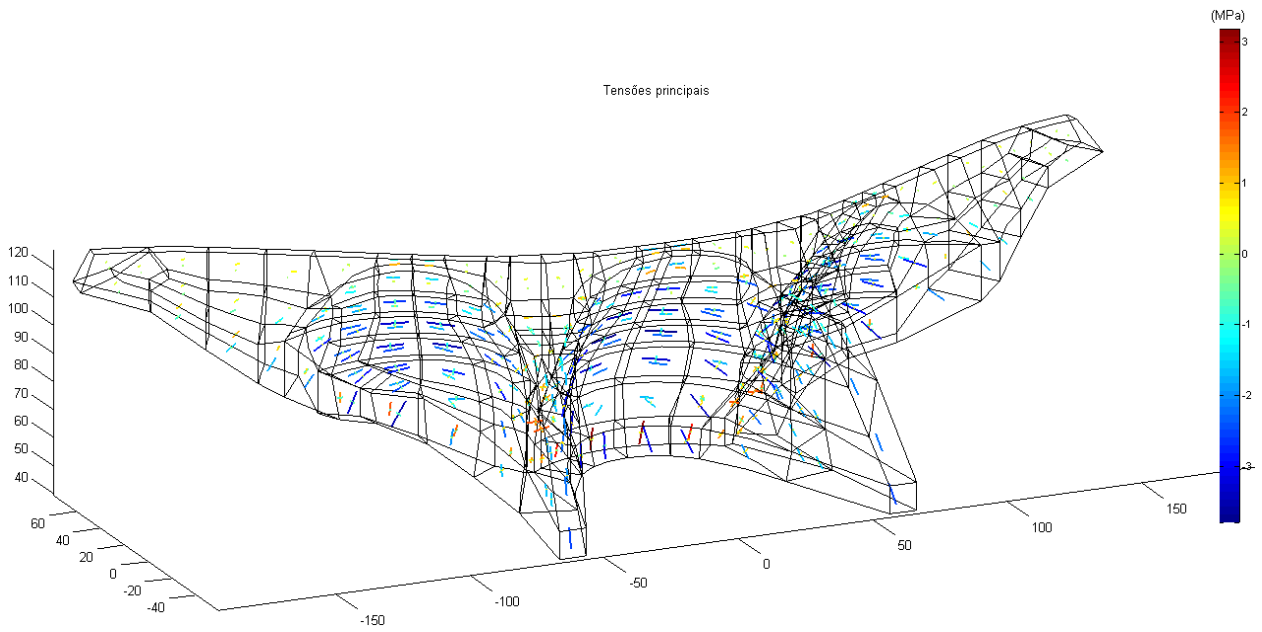


Figura 3.10 – Campo de tensões, devido à pressão hidrostática (cota 126 m).

- Devido à variação de temperatura (aquecimento)

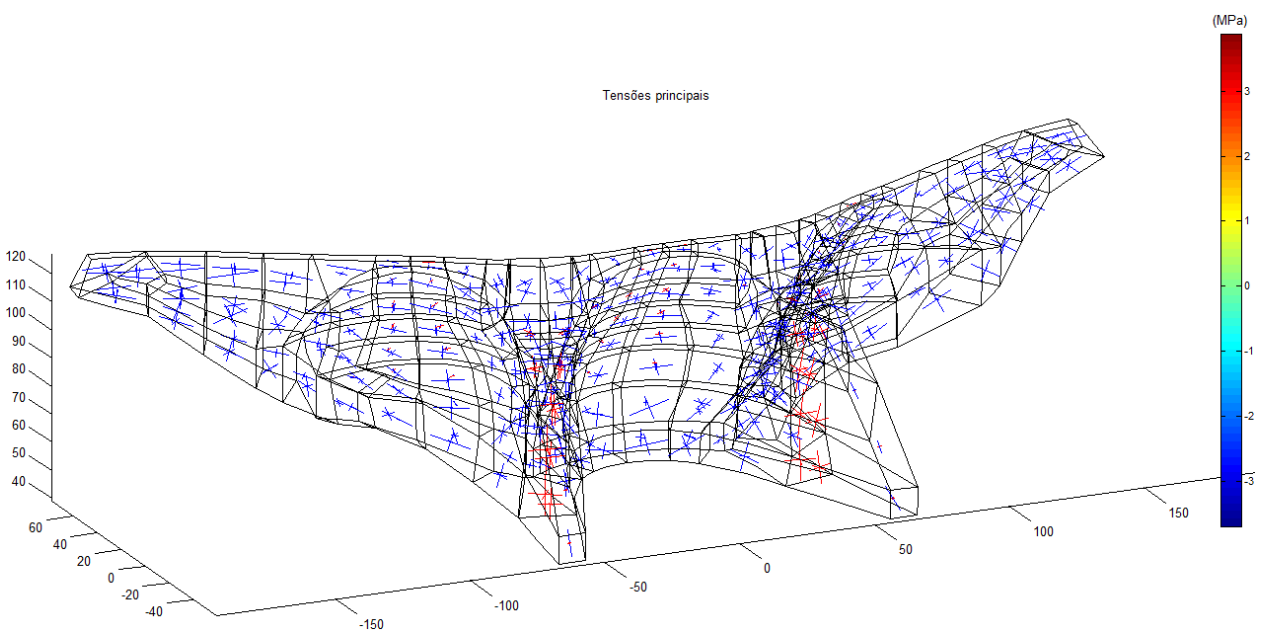


Figura 3.11 – Campo de tensões, devido a um aquecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual.

➤ Devido ao peso próprio

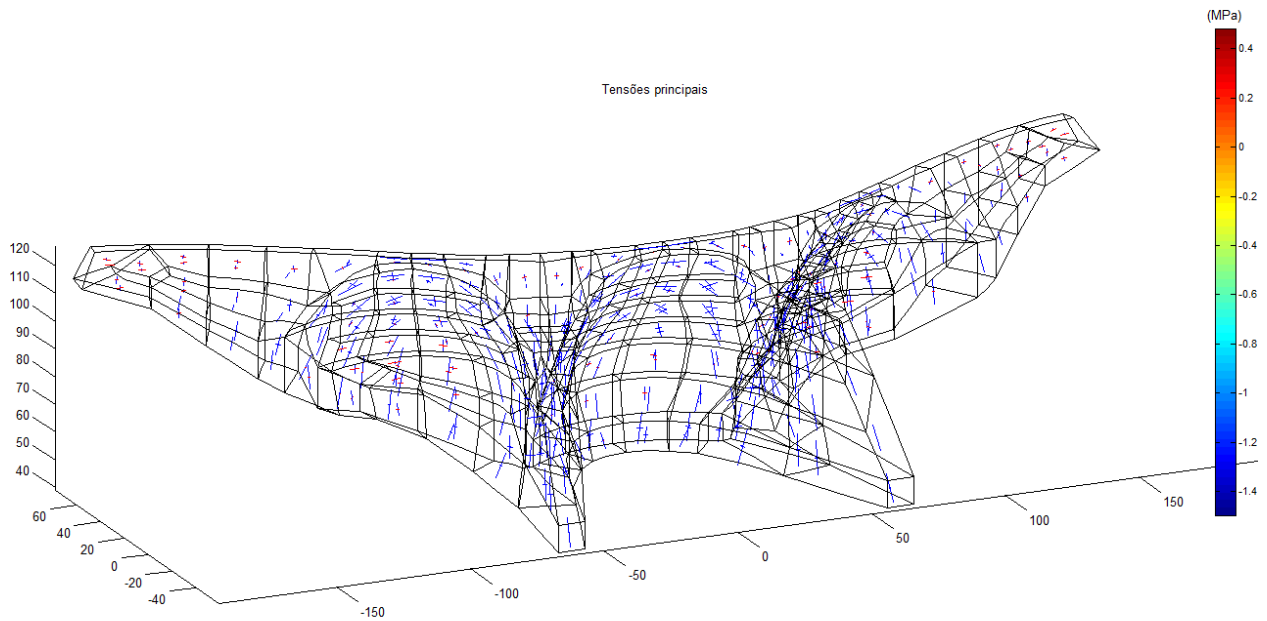


Figura 3.12 – Campo de tensões, devido ao peso próprio.

➤ Devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio

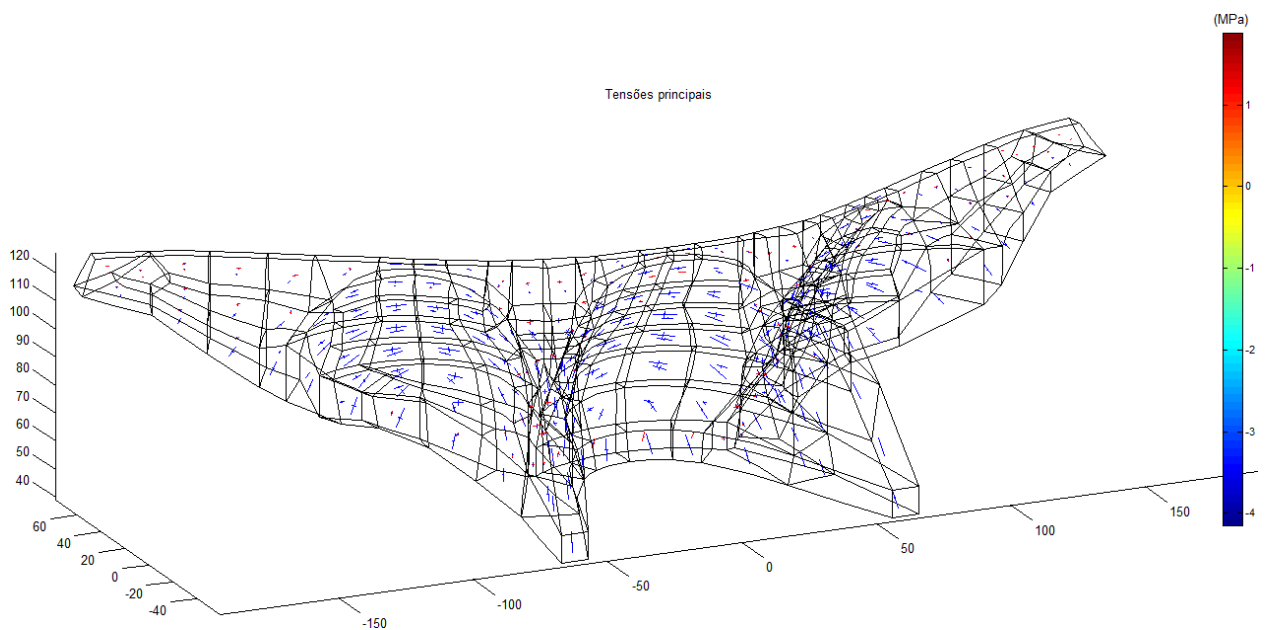


Figura 3.13 – Campo de tensões, devido à pressão hidrostática (cota 126 m) e ao peso próprio.

3.3 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se o *software* **DamSafe1.0**, desenvolvido no NMMR (Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas, DBB-LNEC) no âmbito deste trabalho. Salientaram-se as suas principais potencialidades, em termos de visualização gráfica das grandezas medidas em obra e em termos da facilidade de análise dessas grandezas (observadas ao longo do tempo) com base em MSE e com base em MEF3D. O programa **DamSafe1.0** está preparado para aceder a uma base de dados com algumas das principais barragens portuguesas, com vista a apoiar a análise do comportamento das obras através da utilização integrada de MSE e de MEF3D.

Apresentaram-se em detalhe os diferentes painéis que constituem o programa **DamSafe1.0**:

- i) o painel “Início” permite selecionar a barragem pretendida;
- ii) o painel “Dados Gerais” permite aceder à informação sobre a barragem selecionada, escolher o tipo de aparelho, os pontos de medição e a grandeza a analisar;
- iii) o painel “Interpretação Quantitativa” permite escolher as funções a adotar no MSE; é também possível selecionar a opção para separar o efeito da fluência associada à pressão hidrostática dos outros efeitos do tempo (com possibilidade de escolha dos parâmetros da função de fluência do betão); e a opção para a comparação MSE/MEF;
- iv) o painel “Resultados (IQ)” permite visualizar os gráficos gerados pelo MSE após escolha das funções no painel anterior, para os vários instrumentos selecionados, com a possibilidade de criação de ficheiros .DXF (ACAD); e por fim,
- v) o painel “Modelo EF3D” que permite escolher os parâmetros para efetuar os cálculos com o MEF3D para várias combinações de ações e permite a visualização dos campos de deslocamentos e de tensões instaladas no corpo da barragem.

4

Utilização do programa **DamSafe1.0** na análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira

4.1 Considerações iniciais

No controlo da segurança de grandes barragens em fase de exploração normal é necessário avaliar continuamente se, para as principais solicitações atuantes, o comportamento estrutural observado corresponde ao comportamento previsto. Para tal é de grande interesse dispor de programas como o **DamSafe1.0**, o qual permite analisar os principais resultados observados (registos ao longo do tempo dos valores das principais grandezas que caracterizam as ações e a resposta da estrutura) com base em modelos de separação de efeitos e, simultaneamente, permite simular o comportamento da obra recorrendo a modelos de elementos finitos, efetuando, automaticamente a comparação entre os resultados observados e os resultados previstos por ambos os modelos, o que é fundamental para a avaliação das condições de segurança das obras.

Neste capítulo apresenta-se o caso da barragem da Aguieira para mostrar as potencialidades do programa **DamSafe1.0** no apoio ao controlo da segurança de grandes barragens. Em particular analisa-se a evolução ao longo do tempo do campo de deslocamentos observados na barragem da Aguieira, salientando-se a versatilidade do **DamSafe1.0** para: i) aceder a uma base de dados de barragens (o programa **DamSafe1.0** está preparado para aceder a uma base de dados com elementos sobre a observação das maiores barragens portuguesas,

estando atualmente acessíveis dados de onze barragens): ii) escolher os parâmetros dos modelos de análise quer do MSE quer do MEF; iii) visualizar graficamente os resultados obtidos, quer de forma interativa, na interface acessível aos utilizadores, quer na perspetiva da geração de ficheiros de desenho em formato .DXF, com os principais resultados da análise.

Quanto à análise da resposta da obra em termos do campo de deslocamentos optou-se por começar pela interpretação dos deslocamentos horizontais, medidos por métodos geodésicos (planimetria), e medidos com fios de prumo. Em seguida, apresentam-se os resultados da interpretação dos deslocamentos verticais, medidos com base no método de nivelamento de precisão.

Analisa-se a coerência entre os resultados da análise dos deslocamentos horizontais medidos por geodesia e medidos com os fios de prumo, assim como a coerência entre a evolução ao longo do tempo dos deslocamentos horizontais e verticais e, naturalmente, a coerência entre os resultados observados e os resultados do MSE e do MEF.

Comenta-se ainda o bom acordo entre os resultados dos MSE e os resultados da resposta prevista com o MEF para as principais ações, nomeadamente para a pressão hidrostática e para as variações térmicas de período anual. Quanto aos efeitos do tempo, cuja análise é fundamental para a avaliação/controlo da segurança da obra, refere-se que os modelos disponíveis no programa **DamSafe1.0** apontam para a existência de um processo expansivo, de amplitude moderada, que importa continuar a acompanhar.

Por fim refere-se que, no controlo da segurança de barragens, para além da análise dos deslocamentos, é fundamental analisar também a evolução de várias outras grandezas, nomeadamente, movimentos de juntas e fissuras, extensões e tensões, caudais drenados pela fundação, subpressões, etc..

4.2 A barragem da Aguieira

4.2.1 Estrutura

A barragem da Aguieira, situada no rio Mondego, é uma barragem de abóbadas múltiplas que começou a ser projetada em 1962 e entrou em serviço em 1981. Trata-se de um aproveitamento hidráulico de uma albufeira até 450 hm³ de fins múltiplos, que permite:

- o controlo de cheias (proteção da cidade de Coimbra e do vale Baixo Mondego);
- o fornecimento de água para os sistemas de rega dos campos do Mondego, entre Coimbra e a Figueira da Foz;
- a produção de energia hidroelétrica.

Estruturalmente trata-se de uma barragem com três abóbadas de dupla curvatura apoiadas em dois contrafortes centrais (Figura 4.1). A barragem tem uma altura máxima acima da fundação de 89 m, e uma largura de 400 m ao nível do coroamento.

4.2.2 Fundação

A barragem encontra-se fundada num maciço rochoso que apresenta estratificação alternada de grauvaque, filádio com grafite e xistos.

O maciço apresenta uma fraturação significativa, tem zonas de elevada xistosidade e falhas com aberturas de reduzidas dimensões. Globalmente pode-se considerar que o maciço de fundação tem boa capacidade resistente (sobretudo abaixo dos 15 m de profundidade) e baixas permeabilidades.

Quanto à deformabilidade da fundação os resultados apresentados na publicação "*Estudo das fundações da barragem da Aguieira*" (LNEC, 1974) indicam que a margem esquerda pode ser um pouco mais deformável, tendo-se considerado simplificadamente no MEF, que a fundação tem um comportamento elástico e isotrópico com módulo de elasticidade $E_{fME} = 12,5$ GPa na margem esquerda, e $E_{fMD} = 17,5$ GPa na margem direita (ver Figura 4.2).

a.



b.

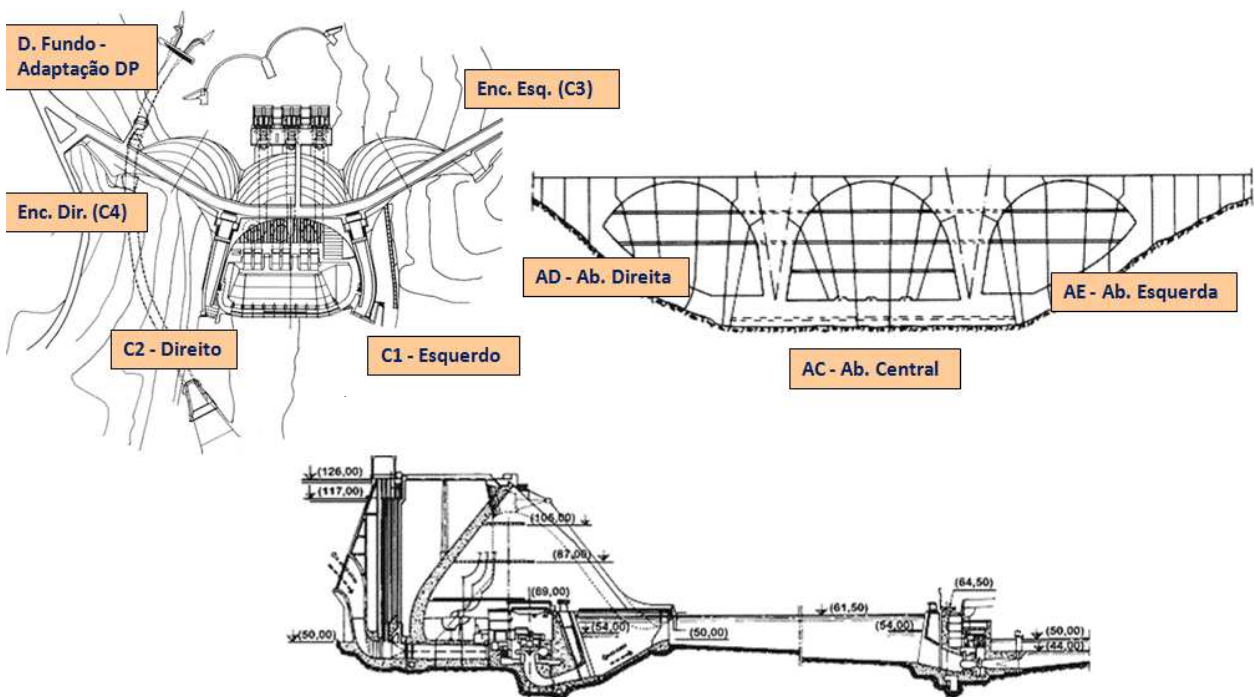
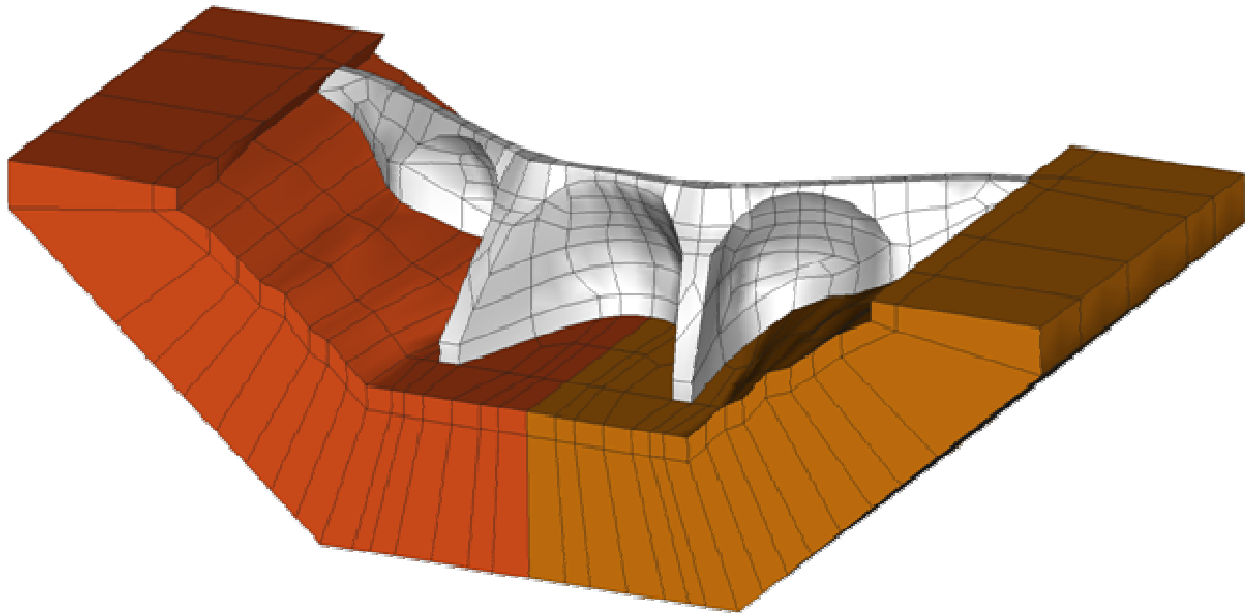


Figura 4.1 – Barragem da Agueira: a. Localização; b. Planta, alçado de jusante e corte transversal.

DISCRETIZAÇÃO EM EF3D (TIPO CUBO, ISOPARAMÉTRICOS DO 2º GRAU, COM 20 PONTOS NODAIS)



DISCRETIZAÇÃO EM EF3D (DAMSAFE1.0)

NÚMERO DE PONTOS NODAIS: 3 159 (9 477 GL)

NÚMERO DE ELEMENTOS: 472 (180 NO CORPO DA BARRAGEM)

(Integração numérica com 27 Pontos de Gauss por elemento)

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Deformabilidade sob ações estáticas




	Betão:	$E_b = 35 \text{ GPa}$	$\nu_b = 0,2$
	Fundação (MD):	$E_{fMD} = 17,5 \text{ GPa}$	$\nu_{fMD} = 0,2$
	Fundação (ME):	$E_{fME} = 12,5 \text{ GPa}$	$\nu_{fME} = 0,2$

Figura 4.2 - Discretização da barragem e da fundação em elementos finitos tridimensionais isoparamétricos com 20 pontos nodais. Zonamento da fundação de acordo com as características de deformabilidade identificadas através de ensaios *in-situ* (LNEC, 1974).

4.2.3 Principais ações. Regime de exploração da albufeira e temperatura do ar

Nesta barragem o regime de exploração da albufeira tem-se caracterizado por variações sazonais do nível da água com uma amplitude de cerca de 10 m, aproximadamente entre a cota 115 m (outubro/novembro) e a cota máxima de 125 m (abril/maio), como se pode ver na Figura 4.3, onde se mostra também a evolução no tempo da temperatura média mensal.

BARRAGEM DA AGUIEIRA

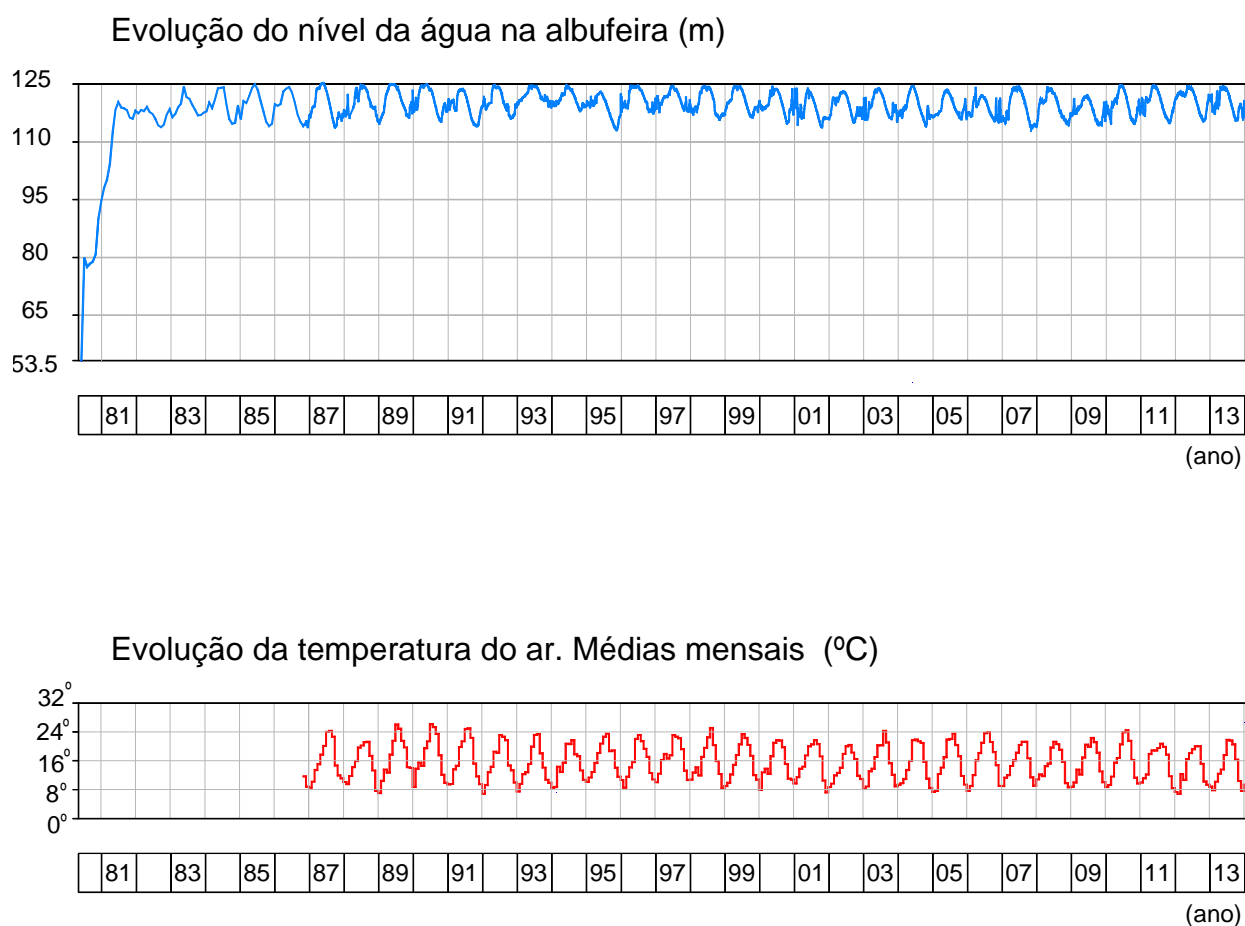


Figura 4.3 – Evolução das principais ações ao longo do tempo. Níveis de água e temperatura do ar.

4.2.4 Composição do betão e caracterização do comportamento viscoelástico

Quanto à composição do betão é de referir que os agregados grossos ($D_{\max} = 150 \text{ mm}$) são de granito e que o ligante é constituído apenas por cimento (sem cinzas), com uma dosagem de 225 kg/m^3 (1:c:a:ag:gr:fi \Leftrightarrow 1:1:0.5:9.4:7.6:1.8) (Ramos, 1985).

Nas figuras seguintes apresentam-se, respetivamente, as curvas representativas da evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo (Figura 4.4), as da função de fluência do betão da barragem da Aguieira (para as idades de carga: 7, 28, 90 e 365 dias) (Figura 4.5a) e as dos correspondentes coeficientes de fluência (Figura 4.5b). Os parâmetros foram ajustados a partir de ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado (Ramos, 1985).

No MEF desenvolvido no presente trabalho para estudo da barragem da Aguieira, durante a calibração do modelo, constatou-se que seria ideal utilizar o valor $E_b = 35 \text{ GPa}$, para módulo de elasticidade do betão integral (Figura 4.2).

BARRAGEM DA AGUIEIRA

EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE: $E(t) = E_0 / [1 + 0.1^n \varphi_1 (t^{-m} + \beta)]$

$E_0 = 41,5 \text{ GPa}$	$\varphi_1 = 1,09$	
$\beta = 0,05$	$m = 0,315$	$n = 0,178$

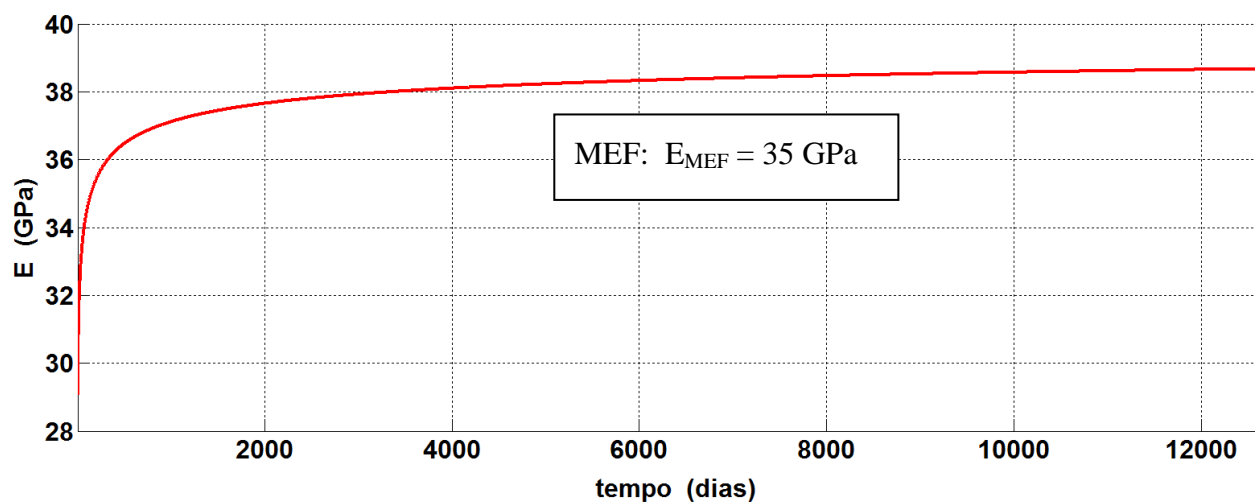
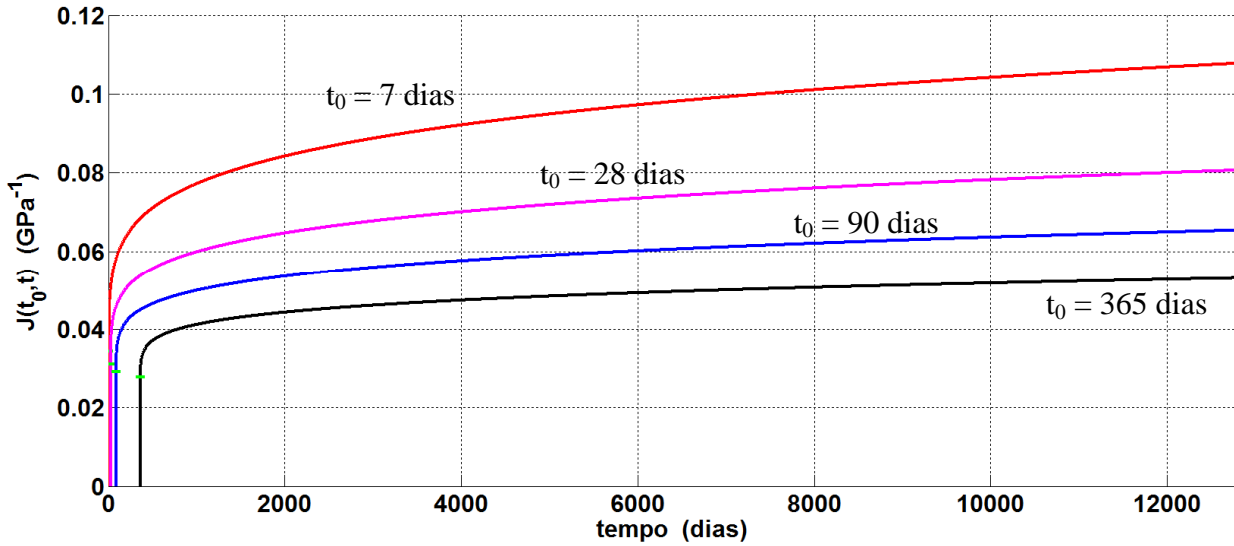


Figura 4.4 – Evolução do módulo de elasticidade do betão da barragem da Aguieira. Curva estimada a partir de ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado e valor adotado no modelo de elementos finitos (valor médio para o betão integral).

BARRAGEM DA AGUIEIRA

a. FUNÇÃO DE FLUÊNCIA: $J(t, t_0) = [1 + \varphi_1(t_0^{-m} + \beta)(t - t_0)^n] / E_0$

$E_0 = 41,5 \text{ GPa}$	$\varphi_1 = 1,09$
$\beta = 0,05$	$m = 0,315$ $n = 0,178$



b. COEFICIENTES DE FLUÊNCIA: $\phi(t, t_0) = E(t) \cdot J(t, t_0) - 1$

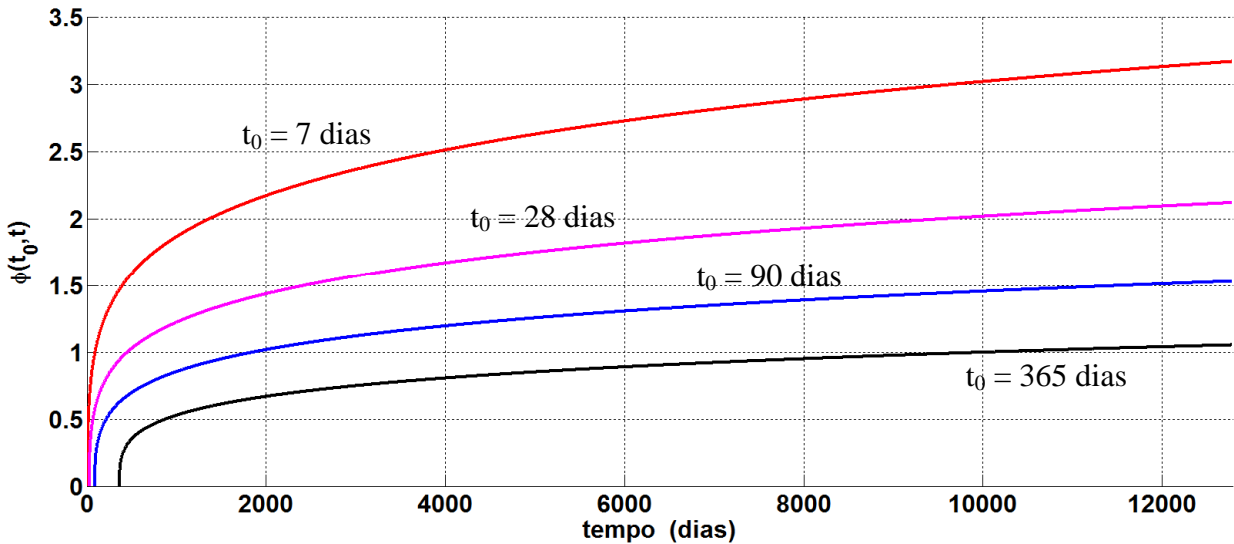


Figura 4.5 – Curvas estimadas a partir de ensaios laboratoriais em provetes de betão crivado da barragem da Aguieira: a. Funções de fluência; b. Coeficientes de fluência relativos às funções de fluência

4.2.5 Alterações químicas no betão. Caracterização do processo expansivo

A análise das extensões medidas nos extensómetros corretores instalados durante a construção (nos grupos de extensómetros Carlson) indica que, em vários pontos da obra, está a ocorrer um progressivo aumento de volume do betão, compatível com a ocorrência de reações expansivas (possivelmente do tipo álcali-silica, tendo em conta a composição química do betão), como se mostra na Figura 4.6. Também os deslocamentos verticais medidos com os extensómetros de varas (Figura 4.7) instalados nos encontros apontam para a existência de expansões no betão (Gomes J. C., 2007). Na margem direita as medições indicam para uma taxa ainda muito reduzida, da ordem de $\epsilon_{exp} = 1,0 \times 10^{-6}$ /ano e na margem esquerda da ordem de $\epsilon_{exp} = 4,5 \times 10^{-6}$ /ano.

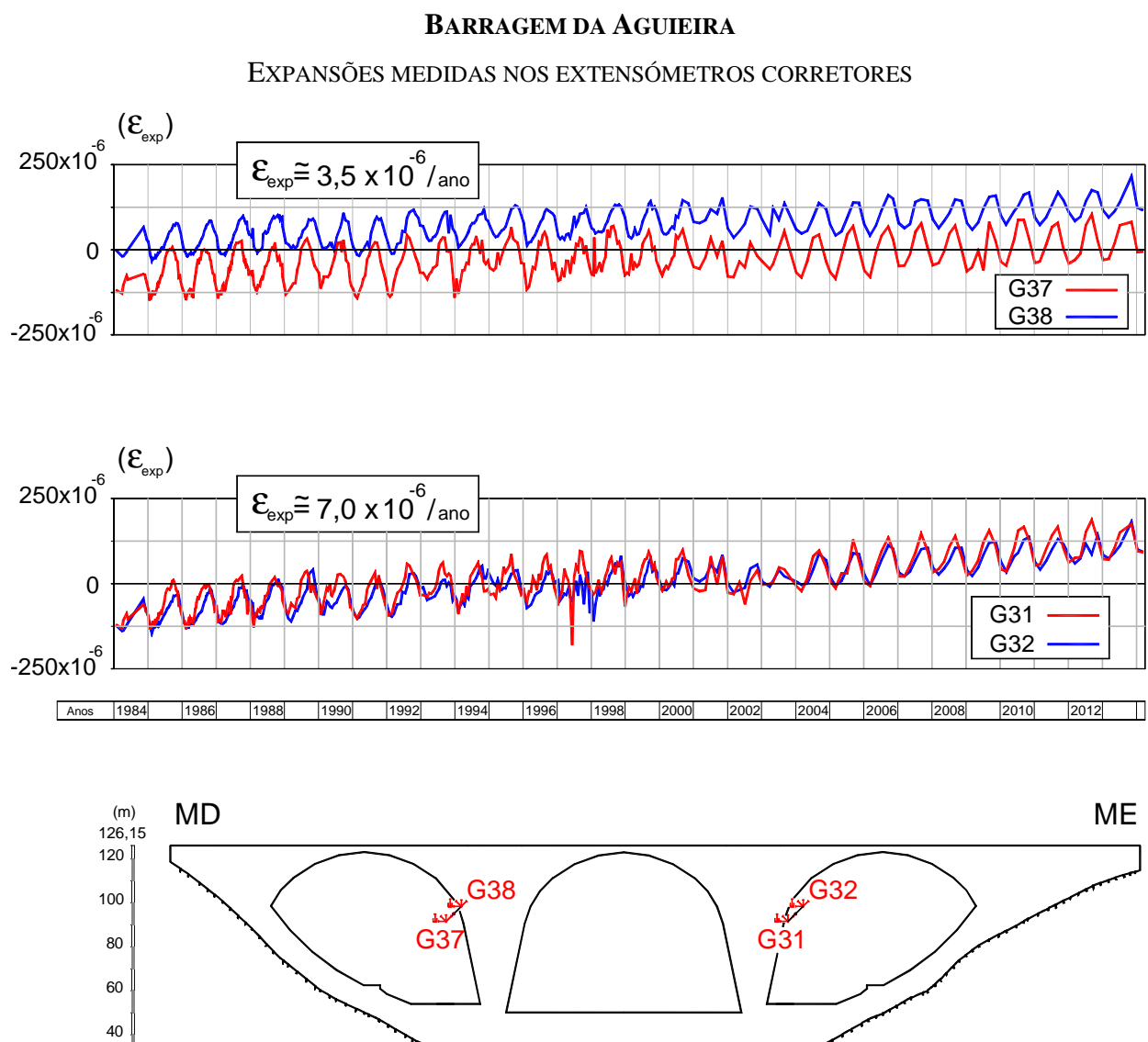


Figura 4.6 – Evolução ao longo do tempo das extensões em quatro extensómetros corretores. O aumento das extensões indicia a ocorrência de reações expansivas da ordem de $\epsilon_{exp} = 3,5 \times 10^{-6}$ /ano, nos corretores dos grupos G37 e G38, e $\epsilon_{exp} = 7 \times 10^{-6}$ /ano nos corretores dos grupos G31 e G32.

BARRAGEM DA AGUIEIRA

EXPANSÕES MEDIDAS NOS EXTENSÓMETROS DE VARAS INSTALADOS NOS ENCONTROS

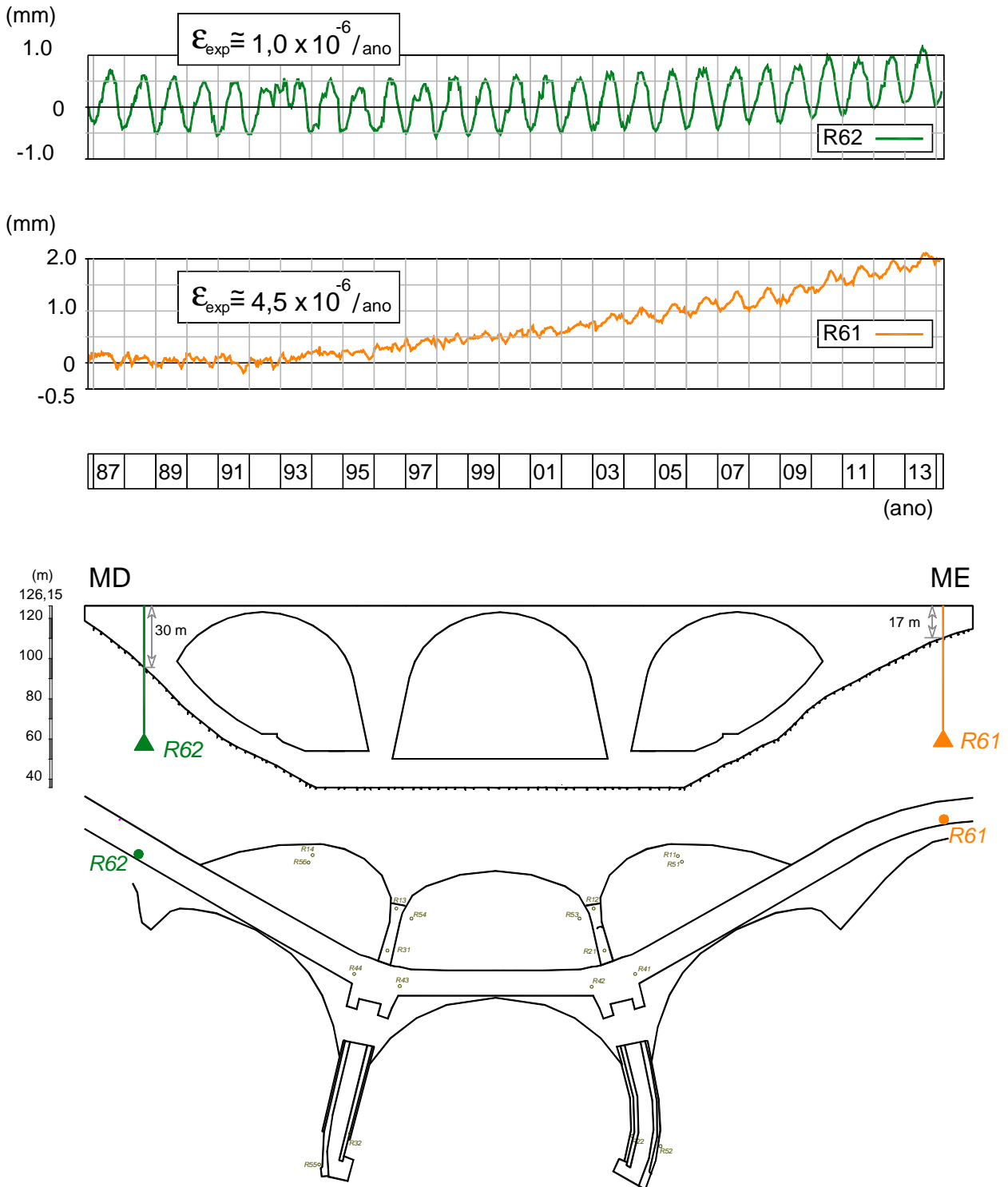


Figura 4.7 – Evolução ao longo do tempo dos deslocamentos verticais em dois extensómetros de varas (verticais) instalados nos encontros. O aumento dos deslocamentos verticais indicia a ocorrência de reações expansivas da ordem de $\epsilon_{exp} = 1 \times 10^{-6} / \text{ano}$, no encontro da margem direita, e $\epsilon_{exp} = 4,5 \times 10^{-6} / \text{ano}$, no encontro da margem esquerda.

4.3 Barragem da Agueira. Análise dos deslocamentos observados

Na barragem da Agueira os deslocamentos no corpo da barragem são observados recorrendo a métodos geodésicos (planimetria para medição de componentes horizontais, e nivelamento de precisão para medição de componentes verticais) e a fios de prumo invertidos para medição de componentes horizontais. Utilizam-se também extensómetros de varas para medição de deslocamentos verticais em alguns pontos da inserção e nos encontros.

4.3.1 Deslocamentos horizontais observados por geodesia (planimetria)

Na Figura 4.8 apresenta-se um alçado de jusante da obra, com a localização das marcas geodésicas utilizadas para medição dos deslocamentos horizontais por planimetria.

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos com o programa **DamSafe1.0** referentes à análise dos deslocamentos observados por geodesia (componentes radiais e tangenciais) em cinco marcas situadas na zona superior da barragem (à cota 122 m): no centro do topo de cada uma das três abóbadas (pontos 6, 8 e 10) e no topo dos dois contrafortes (pontos 7 e 9) (ver Figura 4.8).

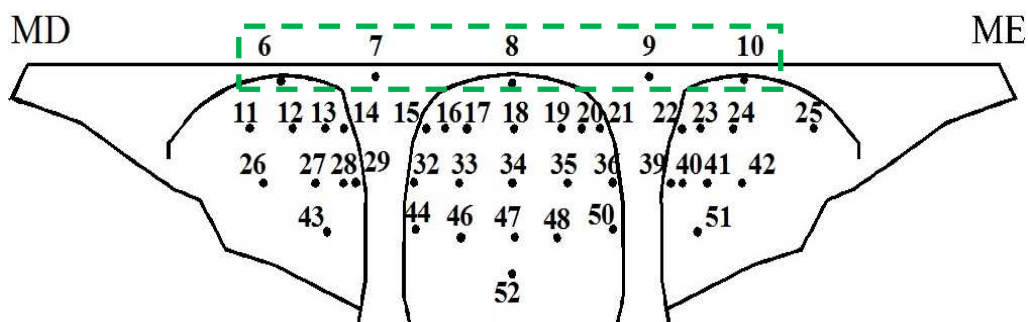


Figura 4.8 – Marcas geodésicas.

4.3.1.1 Deslocamento radial no ponto 8 (no topo da abóbada central, à cota 122 m)

Na Figura 4.9 apresenta-se a análise da componente radial⁵ do deslocamento medido à cota 122 m, a meio da abóbada central: análise comparativa Modelo de Separação de Efeitos *versus* Modelo de Elementos Finitos (MSE/MEF). Foi utilizado um modelo de separação de efeitos com consideração explícita da parcela de fluência associada à pressão hidrostática, cujos parâmetros foram calculados pelo MMQ com vista a obter um ajuste aos valores observados desde o início do período de observação (1980: início do primeiro enchimento) até ao presente ano de 2014, que envolve resultados obtidos em campanhas de observação geodésica realizadas pelo LNEC e pela EDP.

Quanto ao efeito elástico do nível, os resultados obtidos (Figura 4.9) mostram uma boa concordância entre a linha de influência do modelo de separação de efeitos (MSE) e a linha de influência calculada com o modelo de elementos finitos (MEF: $E_{\text{betão}} = 35 \text{ GPa}$). O valor calculado com o MEF para o deslocamento radial máximo neste ponto é de 20 mm na direção jusante (água à cota máxima), ligeiramente inferior ao valor de 20,44 mm do limite do gráfico, estimado pelo MSE, por ajuste aos valores observados.

⁵ A notação está definida nos gráficos em MATLAB e AutoCAD. O sentido positivo é o indicado pelas setas vermelhas, neste caso, para a direção de jusante.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_i(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_i(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-n/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

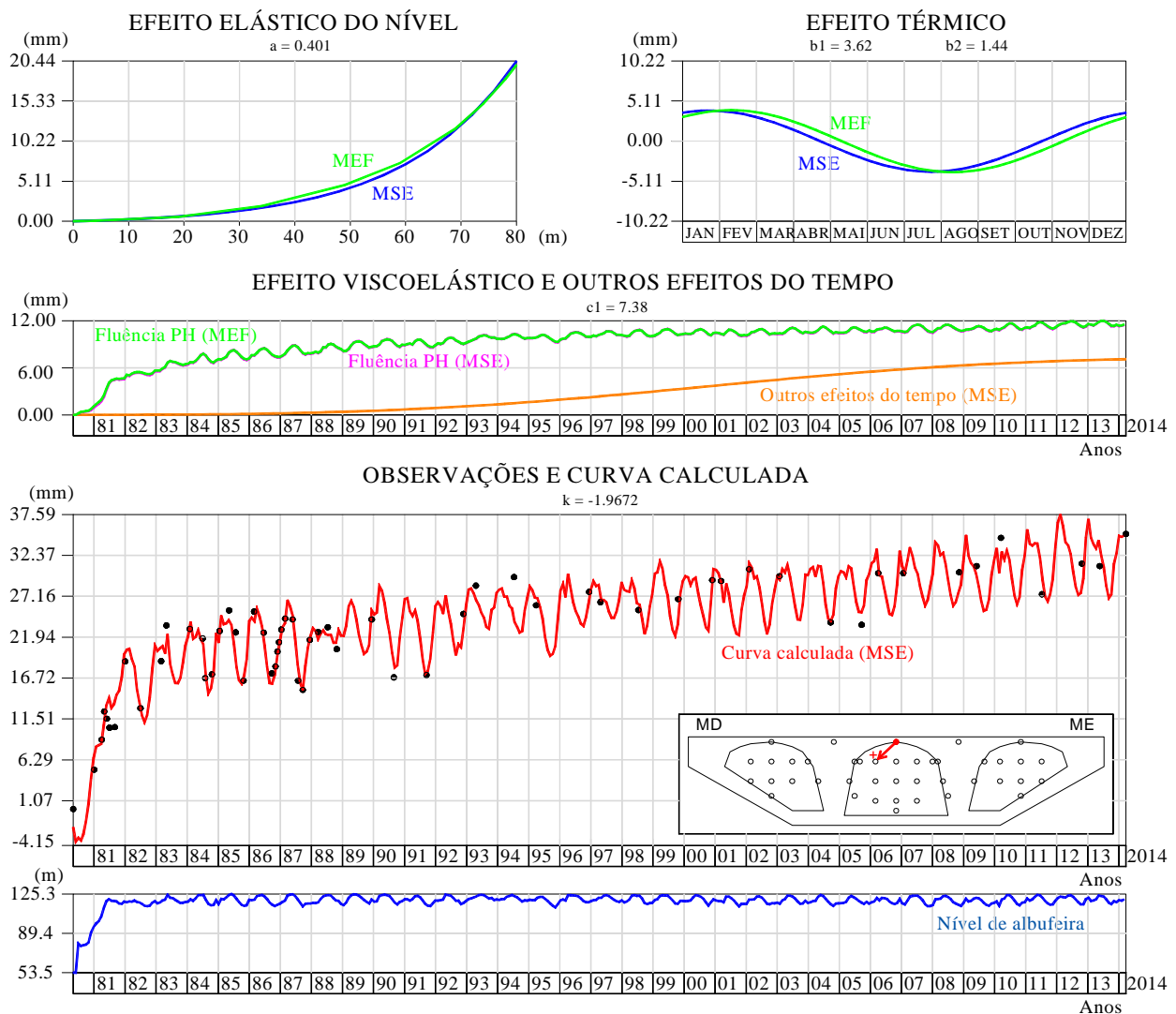


Figura 4.9 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, no topo da abóbada central. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos versus Modelo de Elementos Finitos).

Quanto ao efeito da onda térmica anual sobre o deslocamento radial no ponto em análise, os resultados da Figura 4.9 mostram igualmente uma boa concordância entre a linha de influência do MSE e a linha de influência calculada com o MEF: ondas harmónicas (de período 365,25 dias) praticamente em fase e com semelhante semi-amplitude. O valor do deslocamento radial correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual calculado pelo MEF é de 4 mm, infimamente superior ao valor de 3,9 mm estimado com o MSE.

Quanto aos efeitos do tempo, como se pode ver pela expressão adotada para o modelo de separação de efeitos (Figura 4.9), a componente dos efeitos do tempo não relacionados com a fluência devida à PH, é representada por uma expressão do tipo $e^{-t^m/\beta} - e^{-t^n/\beta}$. Os resultados mostram que para o período em análise, com início na fase de 1º enchimento (1980) até ao presente ano (2014), o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, envolve uma componente de cerca de 12 mm para jusante, devido à fluência associada à PH, e uma componente da ordem dos 7 mm, também para jusante, devida a outros efeitos do tempo. Quanto à componente de fluência associada à pressão hidrostática calculada com o MEF é de referir que foi avaliada pela técnica de aplicação do coeficiente de fluência a vários patamares de discretização do nível da água, considerando a lei de fluência da dupla potência $J(t, t_0) = [1 + \varphi_1(t_0^{-m} + \beta)(t - t_0)^n] / E_0$ (Bazant & Panula, 1979) com $E_0 = 41,5$ GPa, $\varphi_1 = 1,09$, $\beta = 0,05$, $m = 0,315$ e $n = 0,178$ (Ramos, 1985). Esta lei de fluência foi também adotada no modelo de separação de efeitos (para cálculo do coeficiente $\phi(t, t') = E(t)J(t, t') - 1$, em que $E(t) = E_0 / [1 + 0,1^n \varphi_1(t^{-m} + \beta)]$), o que conduziu a um ótimo acordo entre as curvas de fluência do MEF e do MSE (como seria de esperar em face do bom acordo obtido para as linhas de influência do efeito elástico do nível).

Como se verá mais pormenorizadamente nas análises subsequentes, a componente de deslocamento para jusante correspondente aos denominados “outros efeitos do tempo” também é identificada nos restantes pontos analisados, o que se considera coerente com a existência de um processo expansivo. É de notar que os deslocamentos devidos a expansões no betão podem provocar deslocamentos para jusante em barragens de abóbadas múltiplas com contrafortes, como é o caso da barragem da Aguieira, devido ao facto das expansões serem maiores na zona da cabeça dos contrafortes do que na alma (na alma, as expansões desenvolvem-se mais lentamente devido à menor humidade) e, eventualmente, devido também à curvatura em planta do coroamento apresentar convexidade para jusante (ao contrário do que acontece nas abóbadas

simples em que a convexidade em planta é para montante: em barragens de abóbada simples as expansões geralmente provocam deslocamentos no sentido de montante).

4.3.1.2 Deslocamento tangencial no ponto 8 (no topo da abóbada central, à cota 122 m)

O valor da componente tangencial dos deslocamentos medidos por geodesia no ponto a meio da abóbada central à cota 122 m é da ordem dos erros de medição (~1 a 2 mm) pelo que não é possível efetuar a análise com um modelo de separação de efeitos. O facto de não se medirem valores significativos da componente tangencial no ponto central da obra corresponde ao que é previsto com base nos modelos elásticos de EF, segundo os quais a componente tangencial neste ponto deve ser nula para a ação da pressão hidrostática e das variações de temperatura anuais. Também se pode concluir que, por enquanto, não é significativa a parcela do deslocamento tangencial acumulado ao longo do tempo.

4.3.1.3 Deslocamento radial nos pontos 6 e 10 (no topo das abóbadas laterais, à cota 122 m)

Na Figura 4.10 e na Figura 4.11 apresentam-se os resultados das análises comparativas MSE/MEF para os pontos das abóbadas laterais (abóbada direita e abóbada esquerda, respetivamente). É notório o bom acordo entre os resultados do MSE e do MEF, quer em termos do efeito elástico do nível, quer em termos do efeito das variações térmicas de período anual. Quanto ao efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática: evolução ao longo do tempo dos deslocamentos radiais, para jusante) verifica-se também uma boa concordância entre a evolução temporal prevista com o MSE (usando um cálculo simplificado com aplicação de coeficientes de fluência aos deslocamentos elásticos, calculados para os diferentes patamares de carga considerados na discretização do nível da água, e considerando a já referida lei de fluência da dupla potência) e a evolução estimada com o MEF. Quanto à outra parcela dos efeitos do tempo denominada genericamente “outros efeitos do tempo” é praticamente nula na abóbada direita (valor total acumulado de 0,27 mm, para montante, entre 1980 e 2014) e muito reduzida na abóbada esquerda (valor total acumulado de 1,9 mm, para jusante, no mesmo período de análise). Esta parcela poderá incluir o efeito da ação expansiva e o efeito da fluência associada ao peso próprio da estrutura. Nestes dois pontos, situados à cota 122 m, no centro do topo das abóbadas laterais, existe um deslocamento radial (elástico) devido ao peso próprio, de acordo com o MEF, para jusante, pelo que a correspondente parcela viscoelástica também será para jusante, como será referido mais à frente.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_t(t) = c_1 \left(e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta} \right), \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}, \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

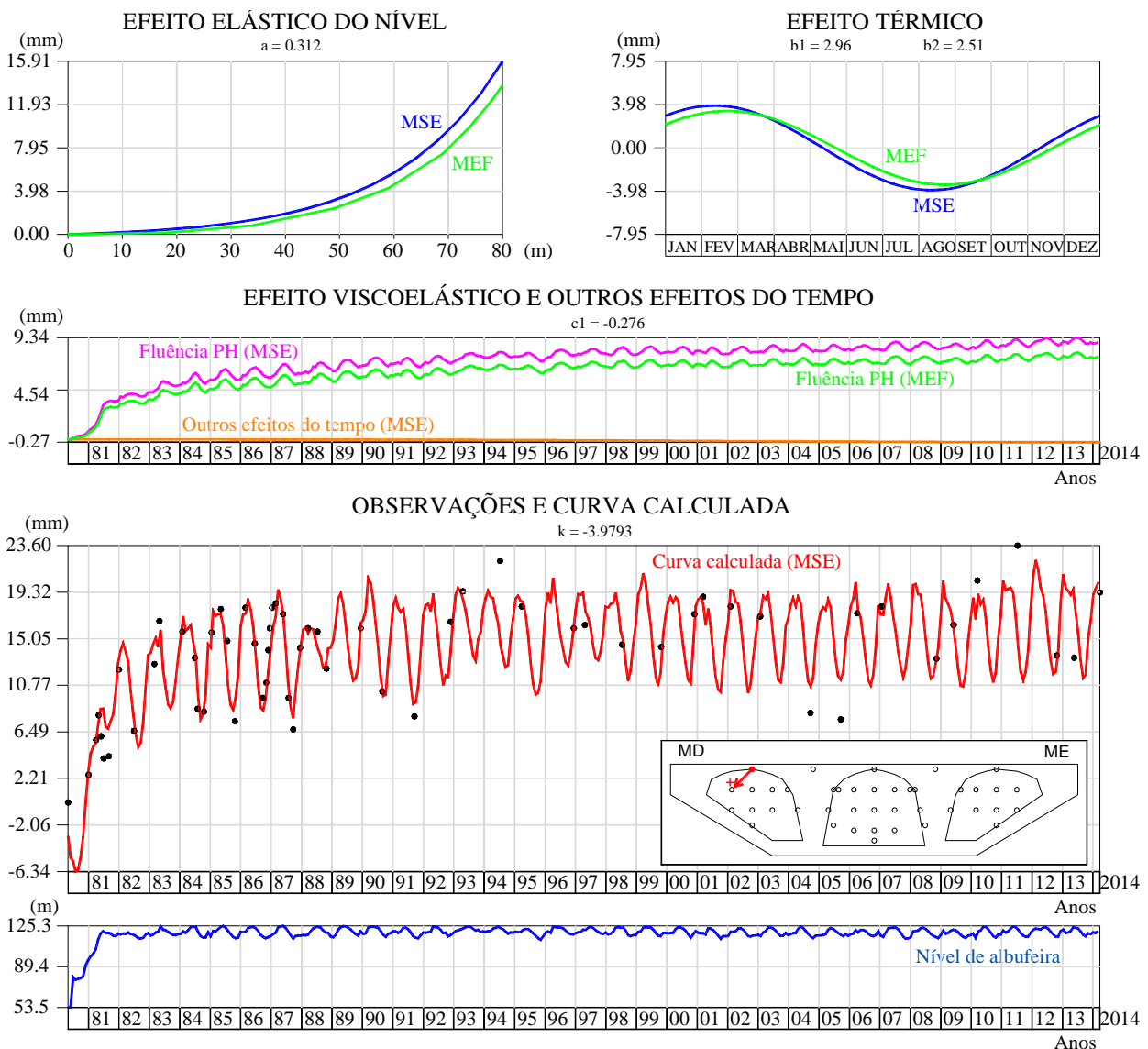


Figura 4.10 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, no topo da abóbada direita. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_t(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

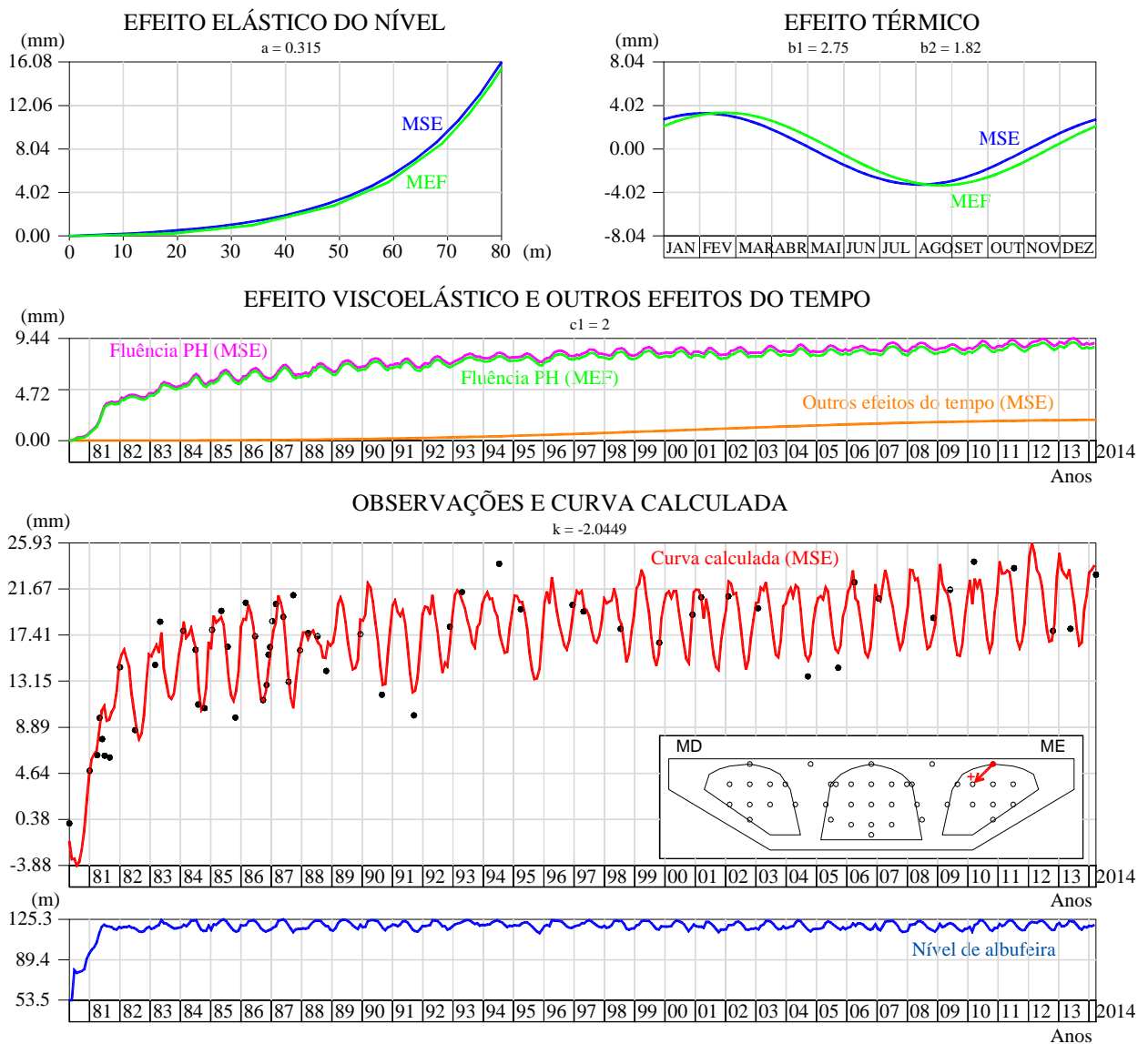


Figura 4.11 – Geodesia: deslocamento radial à cota 122 m, a meio da abóbada esquerda. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

4.3.1.4 Deslocamento radial nos pontos 7 e 9, no topo dos contrafortes (à cota 122 m)

Na Figura 4.12 e na Figura 4.13 apresentam-se os resultados das análises comparativas MSE/MEF para os pontos no topo dos dois contrafortes. É notório, novamente, o bom acordo entre os resultados do MSE e do MEF, sobretudo em termos do efeito elástico do nível, notando que nestes pontos as curvas representativas do efeito elástico do nível apresentam uma menor curvatura o que se deve ao facto de representarem a resposta dos contrafortes, que são elementos estruturais de maior rigidez, comparativamente às abóbadas (abóbadas delgadas).

Na Figura 4.14 apresenta-se uma síntese dos resultados das análises anteriores referentes aos deslocamentos radiais medidos por geodesia em cinco marcas geodésicas situadas na zona superior da obra. Com base nos resultados apresentados nesta figura é possível efetuar facilmente uma análise do comportamento global da obra, em termos do campo de deslocamentos, podendo-se constatar que, globalmente, a obra apresenta um comportamento simétrico não só em termos da resposta elástica e viscoelástica para ação da pressão hidrostática, mas também em termos da resposta elástica às variações térmicas. Quanto aos efeitos do tempo associados ao desenvolvimento das expansões, os resultados não são muito conclusivos, face ao seu reduzido valor acumulado ao longo do tempo. Contudo pode-se notar que, no topo dos contrafortes o efeito da expansão provoca deslocamentos para jusante (de maior valor no contraforte esquerdo) o que se pode justificar pela eventual ocorrência de taxas de expansão maiores na zona das cabeças dos contrafortes do que na zona das almas. Na abóbada central a parcela de deslocamento radial devida à expansão é ainda para jusante mas nas abóbadas laterais identificam-se valores muito próximos do nulo.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a_5 h^5 + a_3 h^3$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

$$u_F(h, t) = a_5 \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (h_j^5 - h_{j-1}^5) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (h_j^5 - h_{j-1}^5) \right] + a_3 \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (h_j^3 - h_{j-1}^3) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (h_j^3 - h_{j-1}^3) \right]$$

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_t(t) = c_1 \left(e^{-t^n/\beta} - e^{-t_a^n/\beta} \right), \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}, \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias}, \quad n = 3,258$$

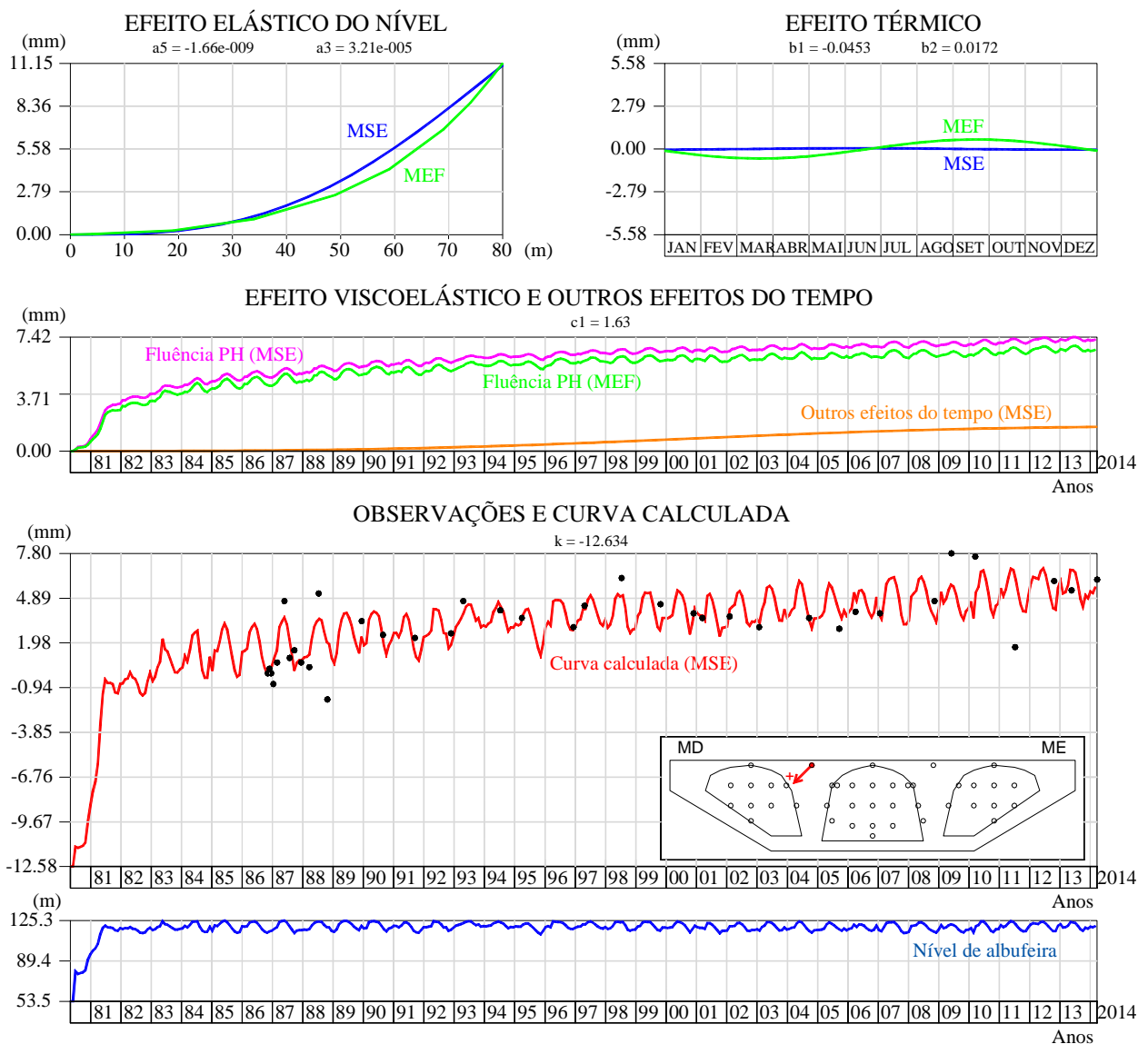


Figura 4.12 – Geodesia: deslocamento radial no topo do contraforte direito, à cota 122 m. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_i(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a_5 h^5 + a_3 h^3$

Efeito elástico das variações térmicas anuais $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

$$u_F(h, t) = a_5 \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (h_j^5 - h_{j-1}^5) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (h_j^5 - h_{j-1}^5) \right] + a_3 \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (h_j^3 - h_{j-1}^3) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (h_j^3 - h_{j-1}^3) \right]$$

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_i(t) = c_1 \left(e^{-t_a^n / \beta} - e^{-t^n / \beta} \right) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

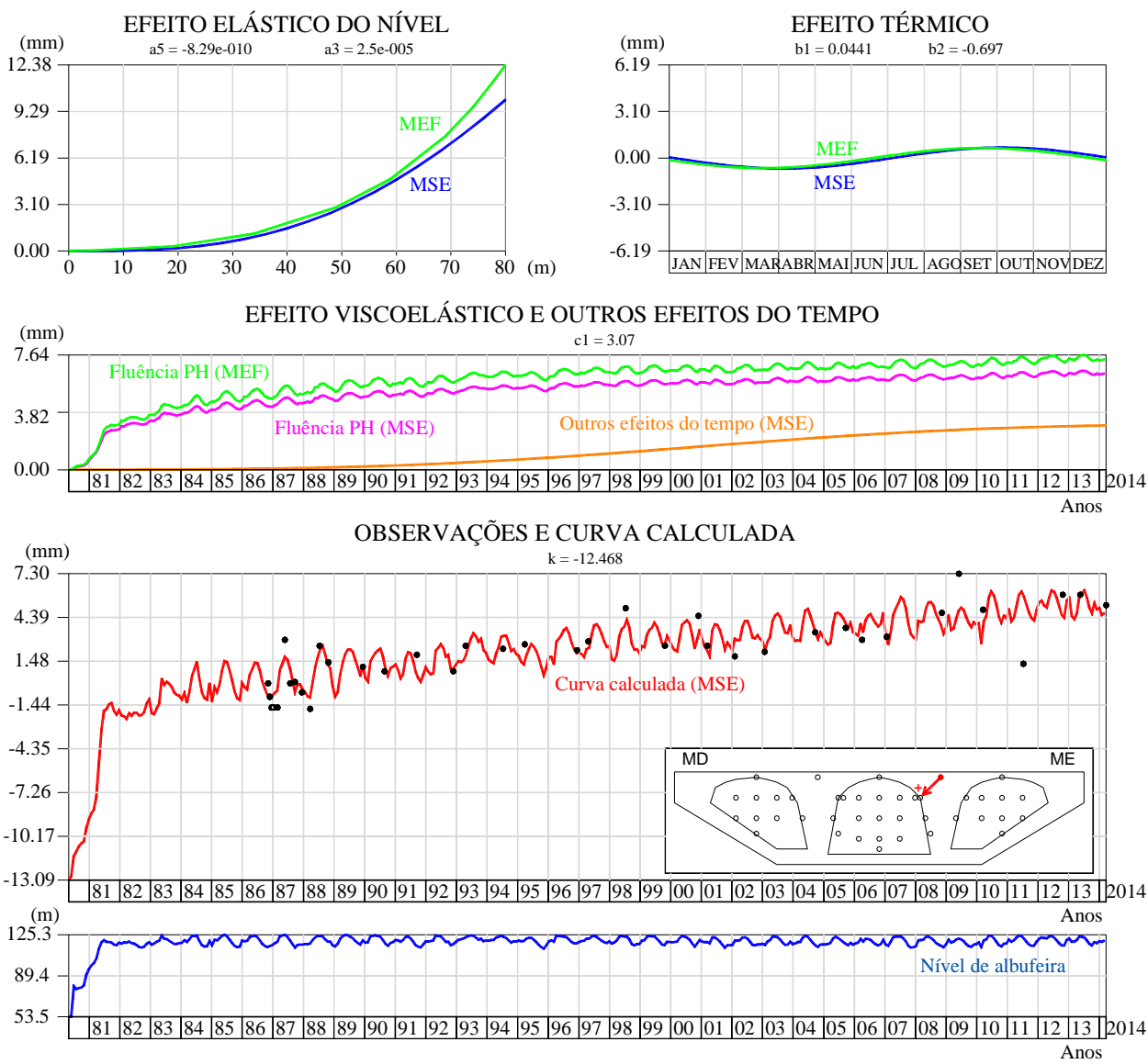
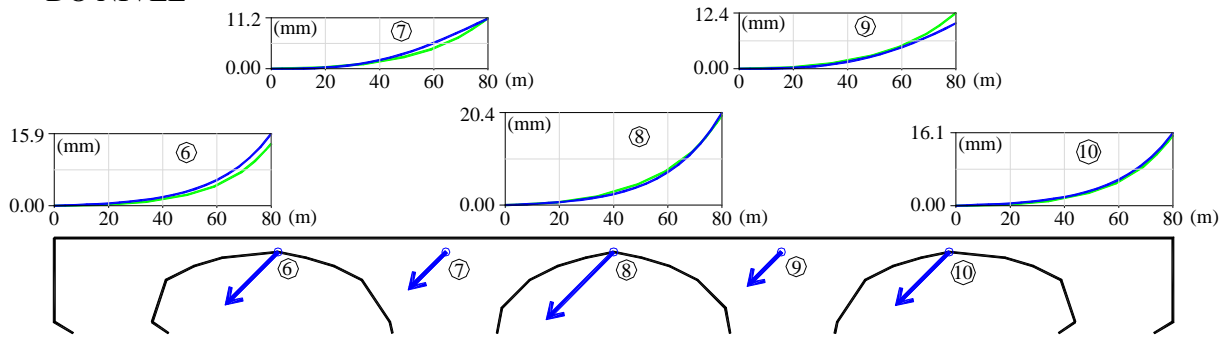


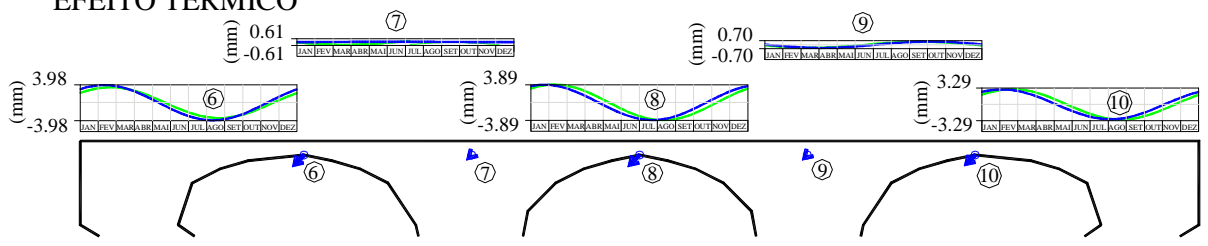
Figura 4.13 – Geodesia: deslocamento radial no topo do contraforte esquerdo, à cota 122 m. Análise comparativa MSE/MEF (Modelo de Separação de Efeitos / Modelo de Elementos Finitos).

GEODESIA

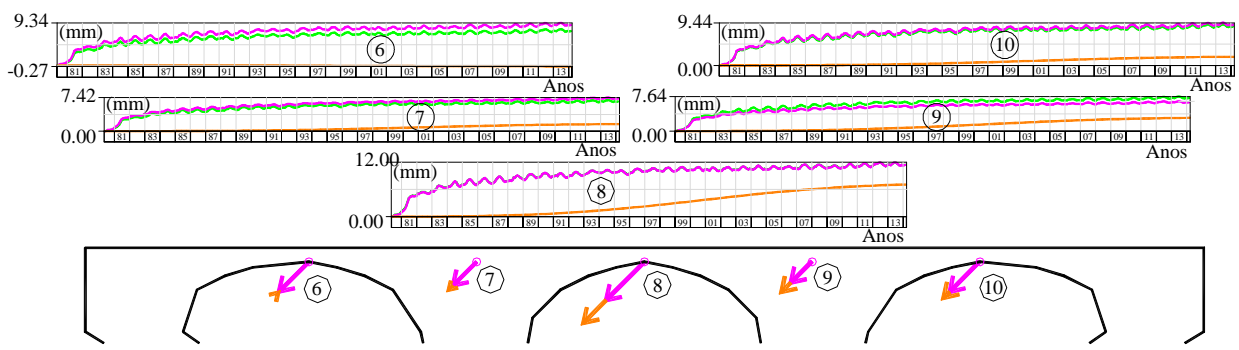
EFEITO ELÁSTICO DO NÍVEL



EFEITO TÉRMICO



EFEITO VISCOELÁSTICO DO NÍVEL E OUTROS EFEITOS DO TEMPO



Efeito da fluência do peso próprio 1980-2014 (MEF)



Efeito da expansão 1980-2014



Figura 4.14 – Deslocamentos radiais medidos por geodesia nos pontos à cota 122 m. Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

4.3.2 Deslocamentos horizontais observados com fios de prumo

Para os fios de prumo, foram selecionados quatro aparelhos situados à cota mais elevada (123,8 m) dos quatro fios de prumo invertidos que se situam no interior dos contrafortes (dois aparelhos em cada contraforte), considerando assim os encontros destes com as abóbadas.

Os aparelhos são o **17 (FPI3)**, **23 (FPI4)**, **29 (FPI5)** e o **35 (FPI6)**. Vejam-se na Figura 4.15:

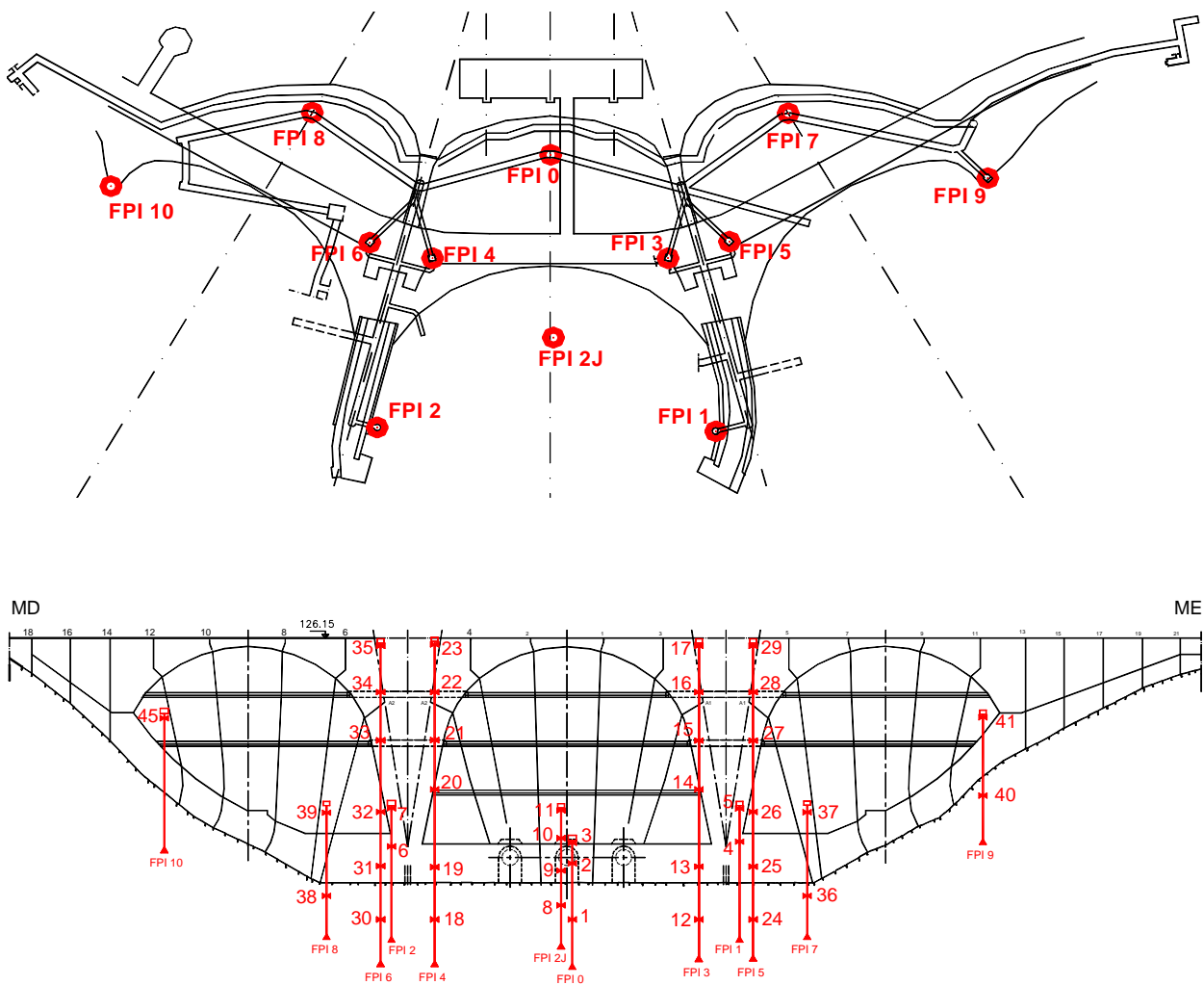


Figura 4.15 – Fios de prumo invertidos. Localização em planta e em alçado, com indicação das bases de leitura.

4.3.2.1 Deslocamentos radiais nos pontos 17, 23, 29 e 35, no topo dos contrafortes (cota 123,8 m)

Na Figura 4.16 apresenta-se para a componente radial do deslocamento medido à cota 123,8 m, no topo do contraforte esquerdo, no fio do lado da abóbada central (ponto 17), a análise comparativa MSE/MEF.

Quanto ao efeito elástico do nível, os resultados obtidos mostram também boa concordância entre a linha de influência do MSE e a linha de influência calculada com o MEF. O valor calculado com o MEF para o deslocamento radial máximo neste ponto, na direção jusante, de 12,89 mm é praticamente igual ao valor de 12,4 mm estimado pelo MSE.

Quanto ao efeito da onda térmica anual no deslocamento radial no ponto em análise, os resultados da Figura 4.16 indicam que o valor do deslocamento radial correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual calculado pelo MEF é de apenas 0,8 mm, também na direção jusante, e no valor de 1,71 mm estimado pelo o MSE.

Quanto aos efeitos do tempo, o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, envolve uma componente de cerca de 7,5 mm para jusante, devido à fluência associada à pressão hidrostática calculada com o MSE, e uma componente da ordem de 5 mm, também para jusante, devida aos outros efeitos do tempo. A componente de fluência associada à pressão hidrostática calculada com o MEF tem o valor de quase 8 mm, também para jusante.

Na Figura 4.17 apresenta-se a análise da componente radial do deslocamento medido no topo do contraforte direito, no fio do lado da abóbada central (ponto 23).

Quanto ao efeito elástico do nível, o valor calculado com o MEF para o deslocamento radial máximo neste ponto é de 11,7 mm, inferior ao valor de 12,16 mm estimado pelo MSE.

Quanto ao efeito da onda térmica anual sobre o deslocamento radial no ponto em análise, o valor do deslocamento radial correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual calculado pelo MEF é de também 0,8 mm e de 1,5 mm pelo MSE.

Quanto aos efeitos do tempo, o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, envolve uma componente de cerca de 7,16 mm para jusante, devido à fluência associada à pressão hidrostática estimada tanto pelo MSE como pelo MEF, e novamente uma componente da ordem dos 5 mm para jusante, devida aos outros efeitos do tempo.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$

Efeito elástico das variações térmicas anuais $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática) $u_F(h, t) = a \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) \right]$

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH) $u_t(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta})$, $\beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}$, $t_{hs}^n = 8000 \text{ dias}$, $n = 3,258$

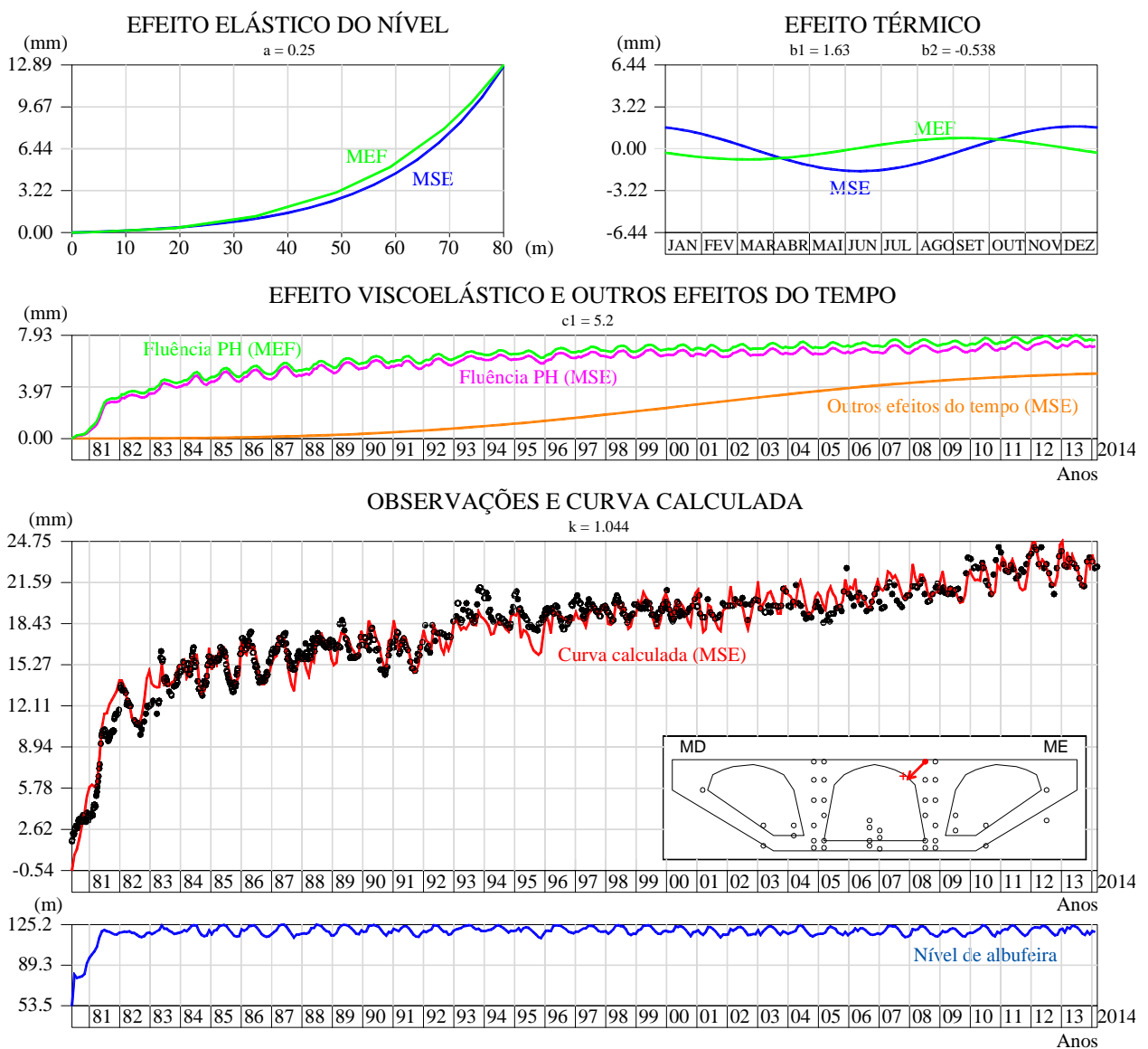


Figura 4.16 – Fios de prumo: Deslocamento radial do ponto 17.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_t(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t'/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

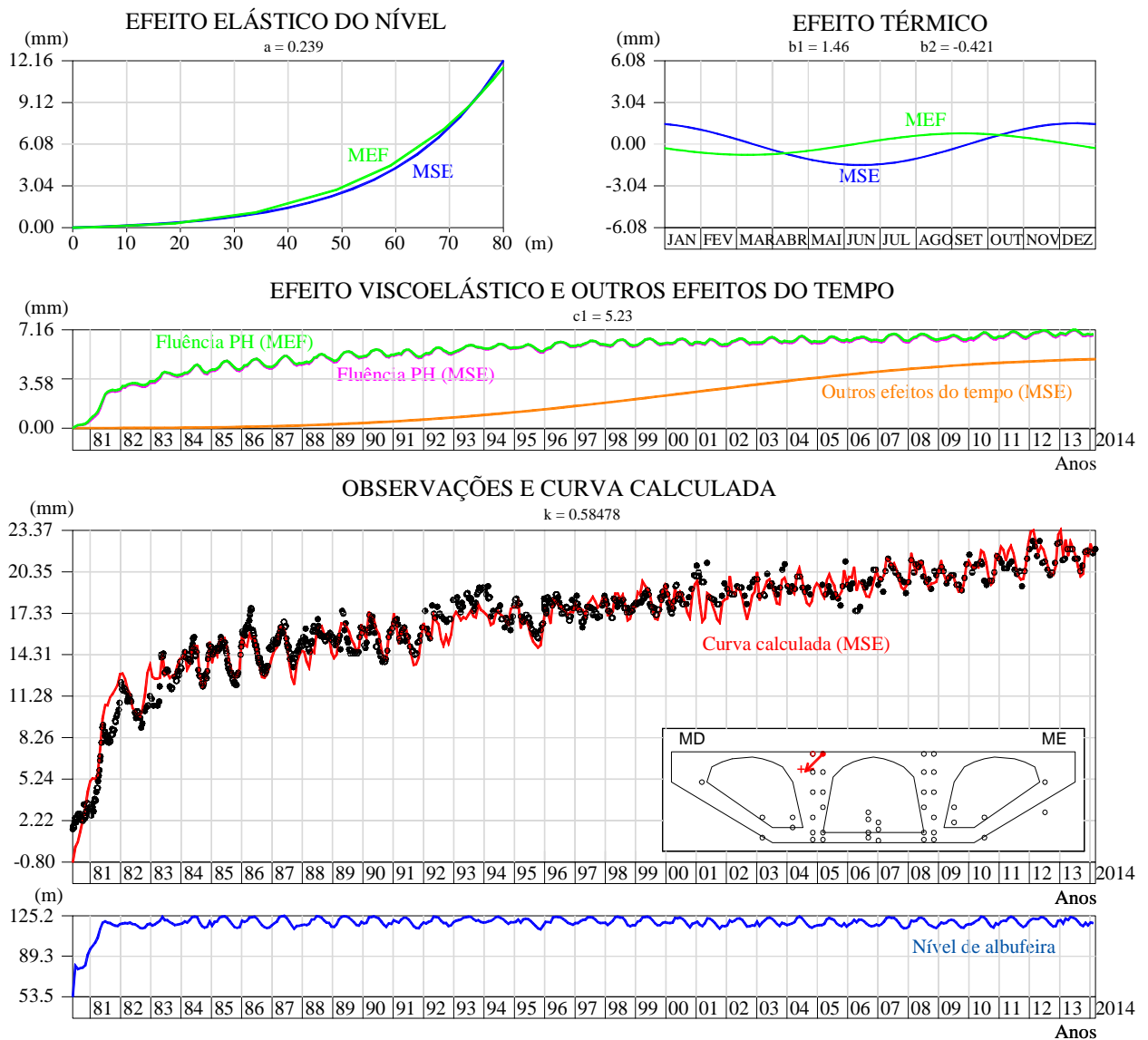


Figura 4.17 – Fios de prumo: deslocamento radial no ponto 23.

Na Figura 4.18 apresenta-se a análise da componente radial do deslocamento medido no topo do contraforte esquerdo, no fio do lado da abóbada esquerda (ponto 29).

Do efeito elástico do nível, os resultados obtidos com o MEF para o deslocamento radial máximo neste ponto é de 12,58 mm, e o valor de 12,1 mm é o máximo estimado pelo MSE.

Quanto ao efeito da onda térmica anual sobre o deslocamento radial no ponto em análise, os resultados ditam que o valor do deslocamento radial correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual calculado pelo MEF é de apenas 0,7 mm e de 1,7 mm estimado com o MSE.

Quanto aos efeitos do tempo, o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, envolve uma componente de cerca de 7 mm para jusante, devido à fluência associada à pressão hidrostática pelo MSE, e uma componente da ordem de 3,7 mm, também para jusante, devida aos outros efeitos do tempo. A componente de fluência associada à pressão hidrostática calculada com o MEF tem o valor de 7,72 mm, também para jusante.

Na Figura 4.19 apresenta-se a análise da componente radial do deslocamento medido agora no topo do contraforte direito, no fio do lado da abóbada direita (ponto 35).

Quanto ao efeito elástico do nível, o valor calculado com o MEF para o deslocamento radial máximo é de 11,32 mm, infimamente inferior aos 11,1 mm estimados pelo MSE.

Quanto ao efeito da onda térmica anual sobre o deslocamento radial no ponto em análise, o valor do deslocamento radial corresponde a 0,6 mm pelo MEF e 1,6 mm pelo MSE.

Quanto aos efeitos do tempo, o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, envolve uma componente de cerca de 6,92 mm devido à fluência associada à pressão hidrostática pelo MEF e de 6,5 mm pelo MSE, existindo ainda 3,1 mm para jusante, dos outros efeitos do tempo.

Na Figura 4.20 apresenta uma nova síntese dos resultados das análises referente aos deslocamentos radiais medidos, agora, pelos fios de prumo no topo dos dois contrafortes. Constata-se de novo que, globalmente, a obra apresenta comportamento simétrico tanto relativamente à resposta elástica, na viscoelástica para ação da pressão hidrostática, como na resposta elástica às variações térmicas. Quanto aos efeitos do tempo associados ao desenvolvimento das expansões, obtiveram-se com os fios de prumo valores superiores no topo dos contrafortes, comparativamente com os resultados da geodesia.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_r(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_r(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t'/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

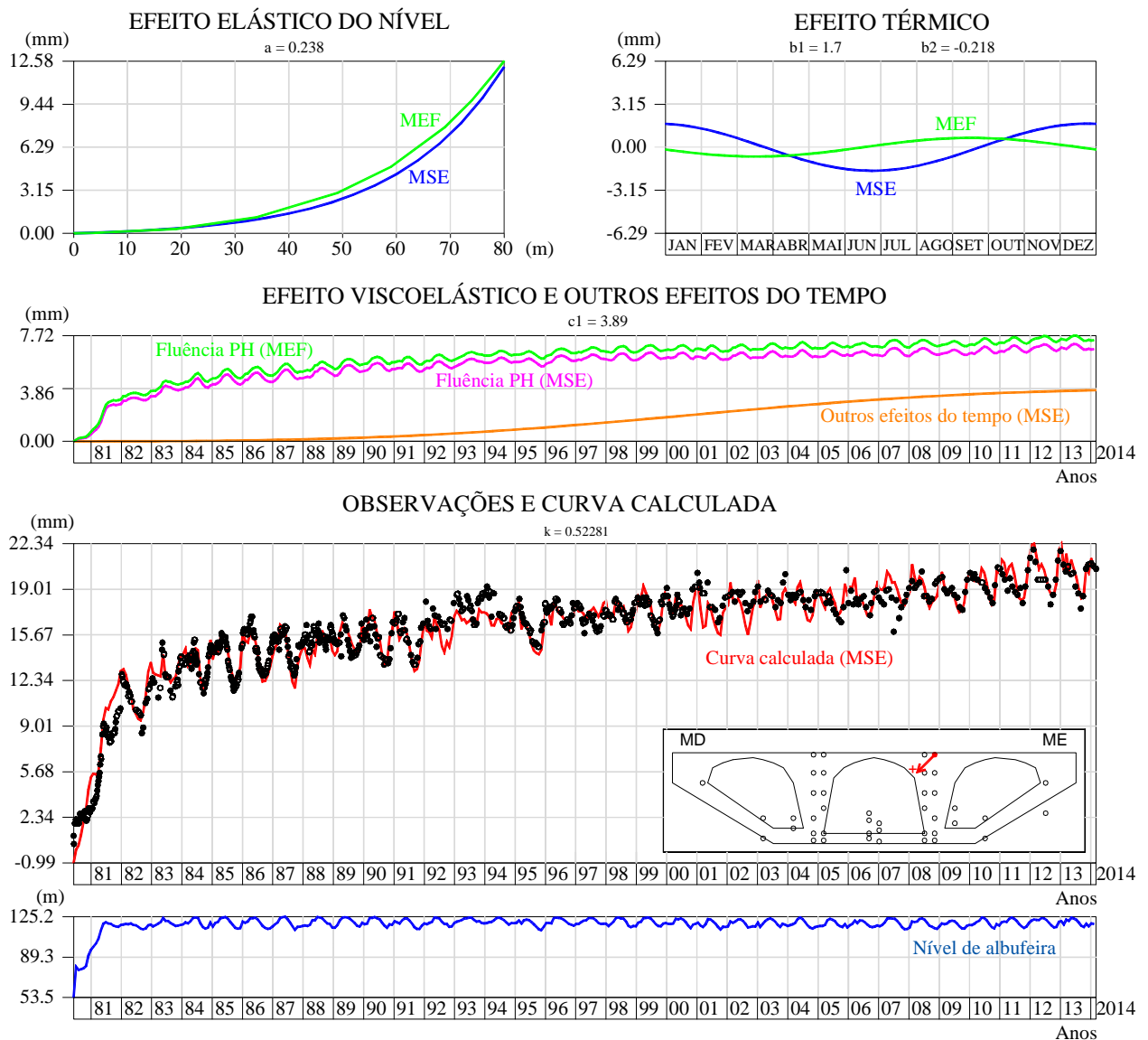


Figura 4.18 – Fios de prumo: Deslocamentos radiais do ponto 29.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_i(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$

Efeito elástico das variações térmicas anuais $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_i(t) = c_1 \left(e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta} \right), \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}, \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

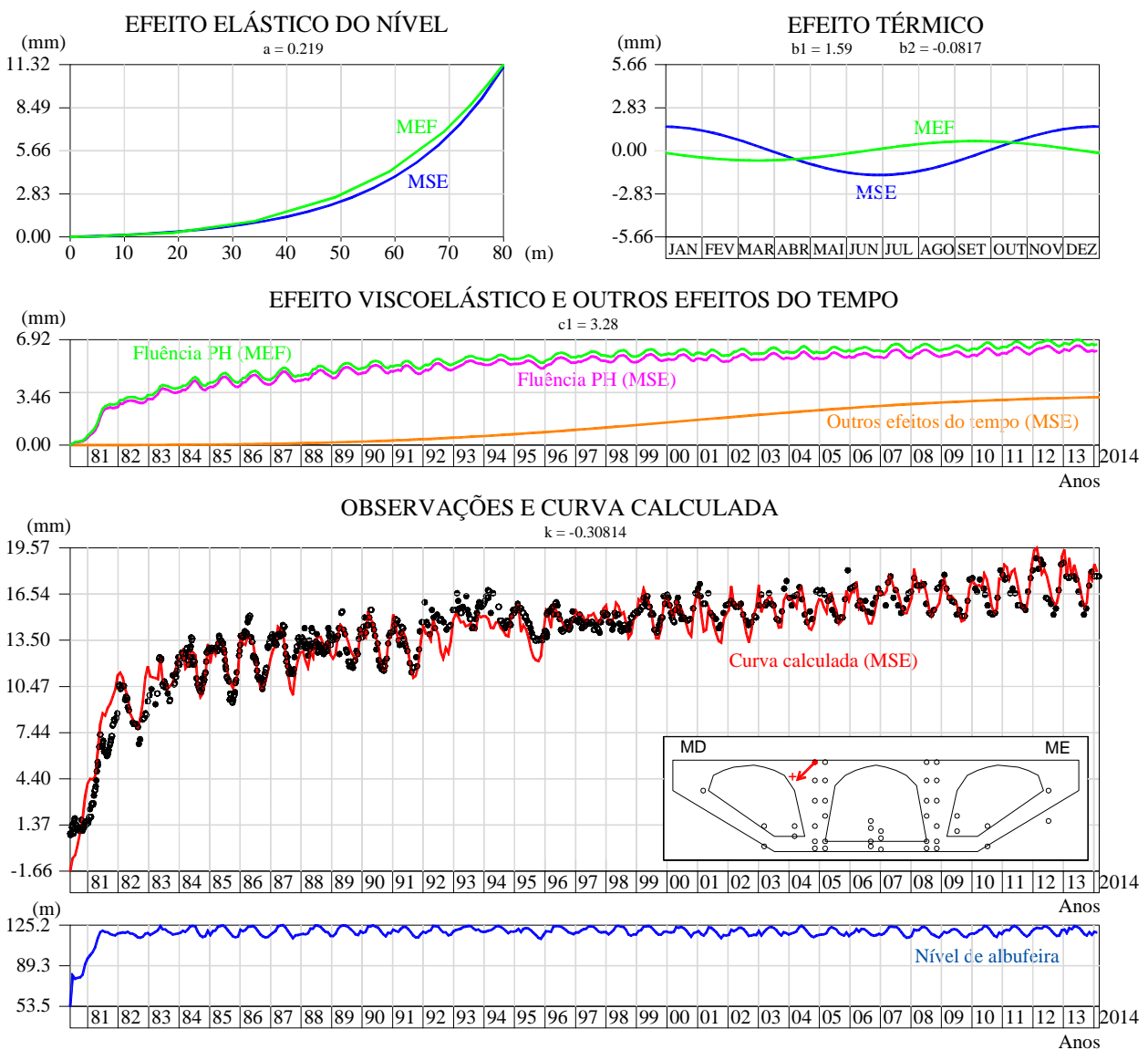
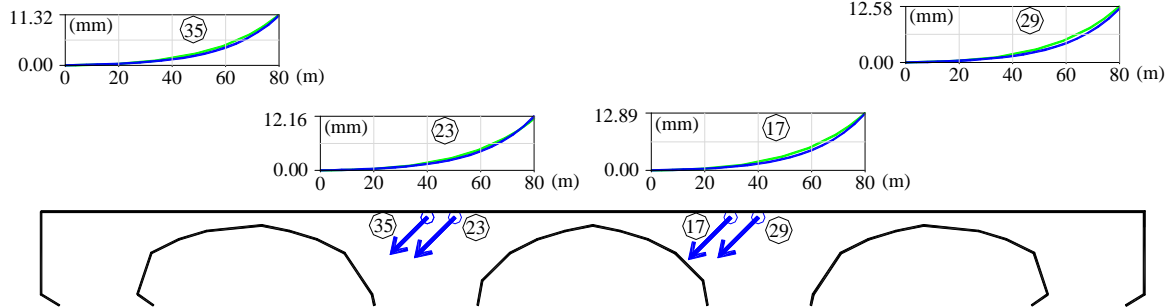


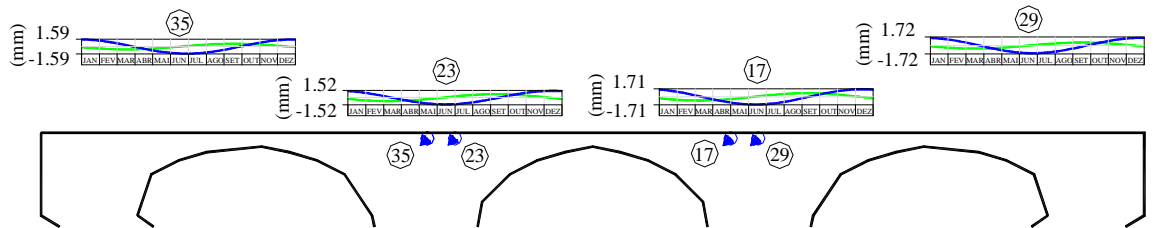
Figura 4.19 – Fios de prumo: Deslocamentos radiais do ponto 35.

FIOS DE PRUMO

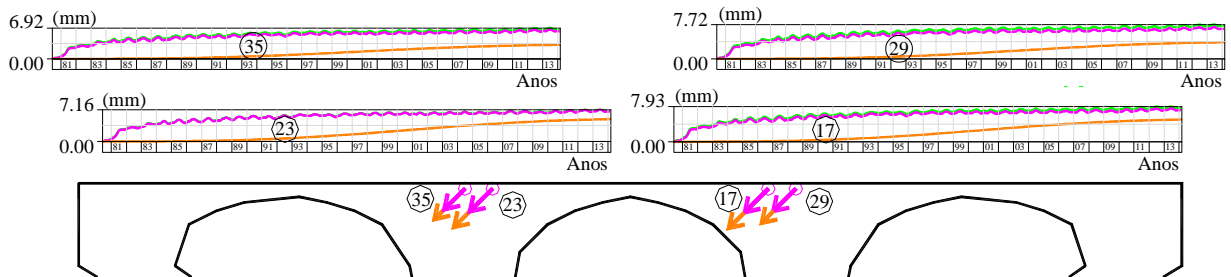
EFEITO ELÁSTICO DO NÍVEL



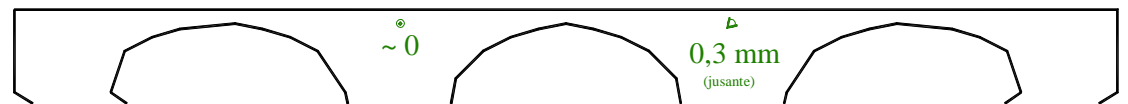
EFEITO TÉRMICO



EFEITO VISCOELÁSTICO DO NÍVEL E OUTROS EFEITOS DO TEMPO



Efeito da fluência do peso próprio 1980-2014 (MEF)



Efeito da expansão 1980-2014



Figura 4.20 – Deslocamentos radiais medidos por fios de prumo nos pontos à cota 123,8 m. Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

4.3.3 Deslocamentos verticais observados por nivelamento

Apresentam-se em seguida os resultados da análise dos deslocamentos verticais observados em algumas das marcas de nivelamento localizadas no piso da galeria do coroamento, à cota 123,5 m (Figura 4.21). Foram escolhidas as marcas situadas na zona sobre os topos dos contrafortes e dos centros das abóbadas: a **8** sobre o topo da abóbada esquerda, a **10** no topo do contraforte esquerdo, a **12** sobre o topo da abóbada central, a **14** no topo do contraforte direito e ainda a **16** sobre o topo da abóbada esquerda.

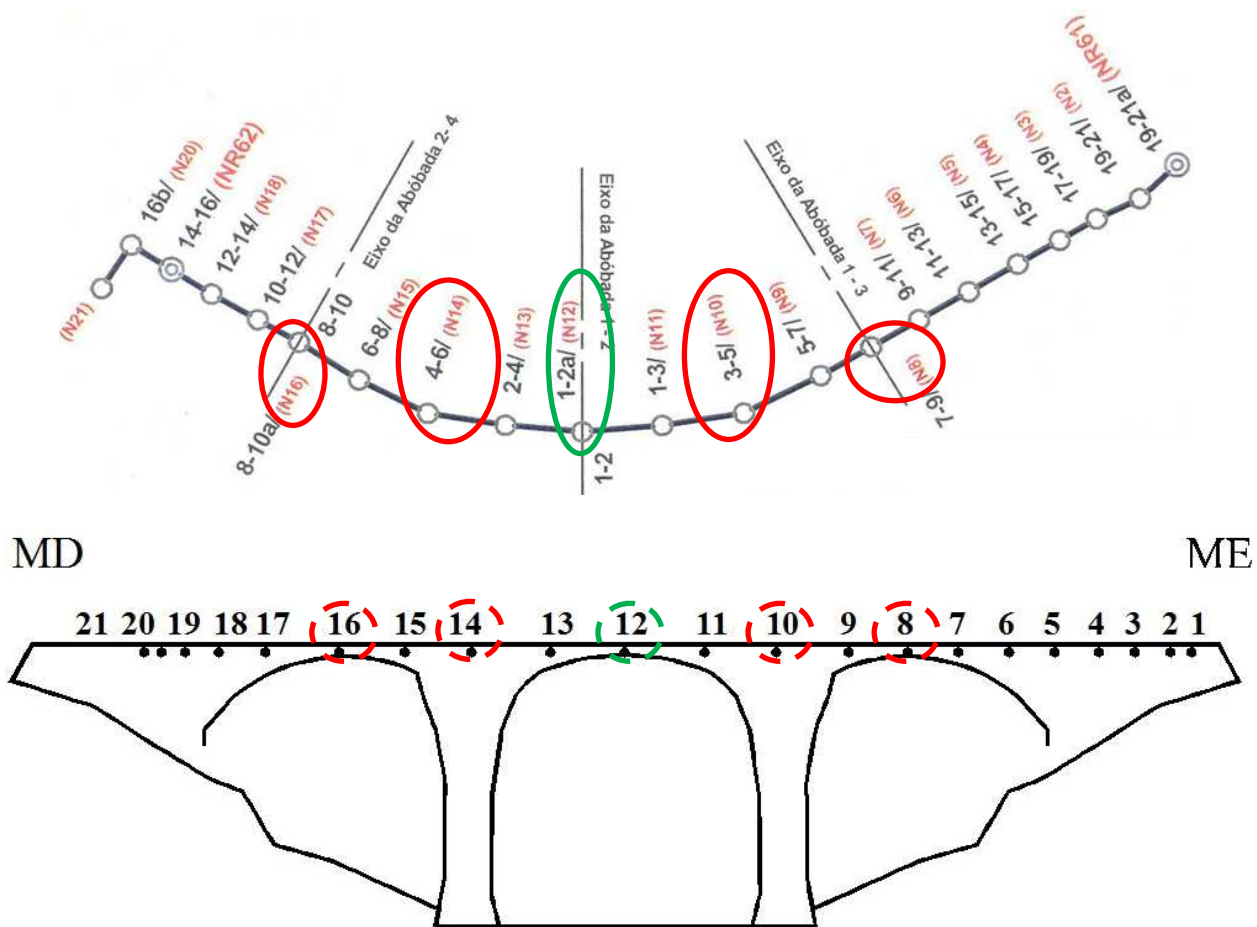


Figura 4.21 – Planta e alçado longitudinal jusante das marcas de nivelamento, no coroamento.

Verticalmente, ocorrem extensões que assumem o sentido ascendente e que é, como se poderá ver nas páginas seguintes, oposto aos deslocamentos provocados pela subida do nível de água e pela ação da fluência do betão, que por serem de sinal negativo, demonstram o andamento do coroamento para baixo.

4.3.3.1 Deslocamento vertical nos pontos 8, 10, 12, 14 e 16, no coroamento (à cota 123,5 m)

Na Figura 4.22 apresenta-se a análise da componente vertical do deslocamento medido à cota 123,5 m, no meio do coroamento (ponto 12). Neste ponto, os resultados da análise do deslocamento vertical efetuada com o MSE e o MEF, mostram uma boa concordância, exceto na componente do efeito da onda térmica anual. O valor calculado com o MEF e com o MSE para o deslocamento vertical máximo neste ponto devido ao efeito elástico do nível é da ordem dos 5 mm, na direção descendente. Quanto aos efeitos do tempo, o deslocamento total acumulado ao longo do tempo, mostra uma componente de cerca de 3 mm para baixo, devido à fluência associada à pressão hidrostática pelo MSE, e uma componente de cerca de 1 mm, mas no sentido ascendente, devida aos outros efeitos do tempo. A componente de fluência associada à pressão hidrostática calculada com o MEF tem o valor de quase 2,6 mm, acompanhando a curva calculada pelo MSE, também no sentido descendente.

Relativamente aos deslocamentos verticais nos restantes pontos estudados, não se obtém uma concordância tão boa na comparação MSE/MEF como no ponto atrás referido. Observam-se valores de deslocamentos superiores no sentido ascendente nos pontos observados na zona central no topo das abóbadas (pontos 8 e 16) do que nos contrafortes (pontos 10 e 14), devidos ao efeito elástico do nível e também ao efeito viscoelástico. Os deslocamentos associados aos outros efeitos do tempo são praticados no sentido ascendente.

Na Figura 4.27 apresenta-se um desenho de síntese com os resultados da análise dos deslocamentos verticais, obtidos por nivelamento.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$ **Efeito elástico das variações térmicas anuais**
 $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)
 $u_F(h, t) = a \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) \right]$

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)
 $u_t(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t_{hs}^n/\beta})$, $\beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}$ $t_{hs}^n = 8000 \text{ dias}$ $n = 3,258$

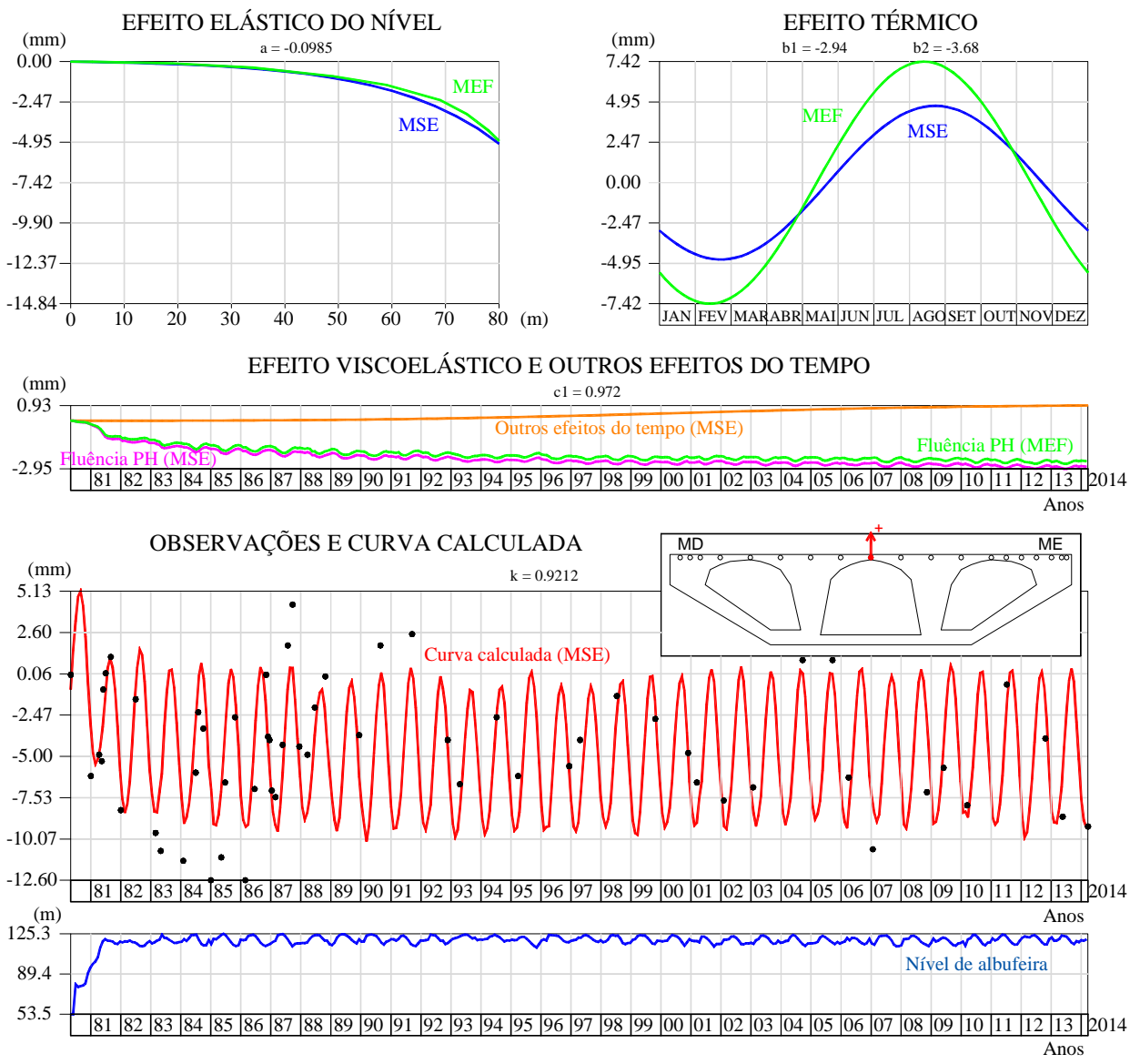


Figura 4.22 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 12.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_t(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_t(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t'/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

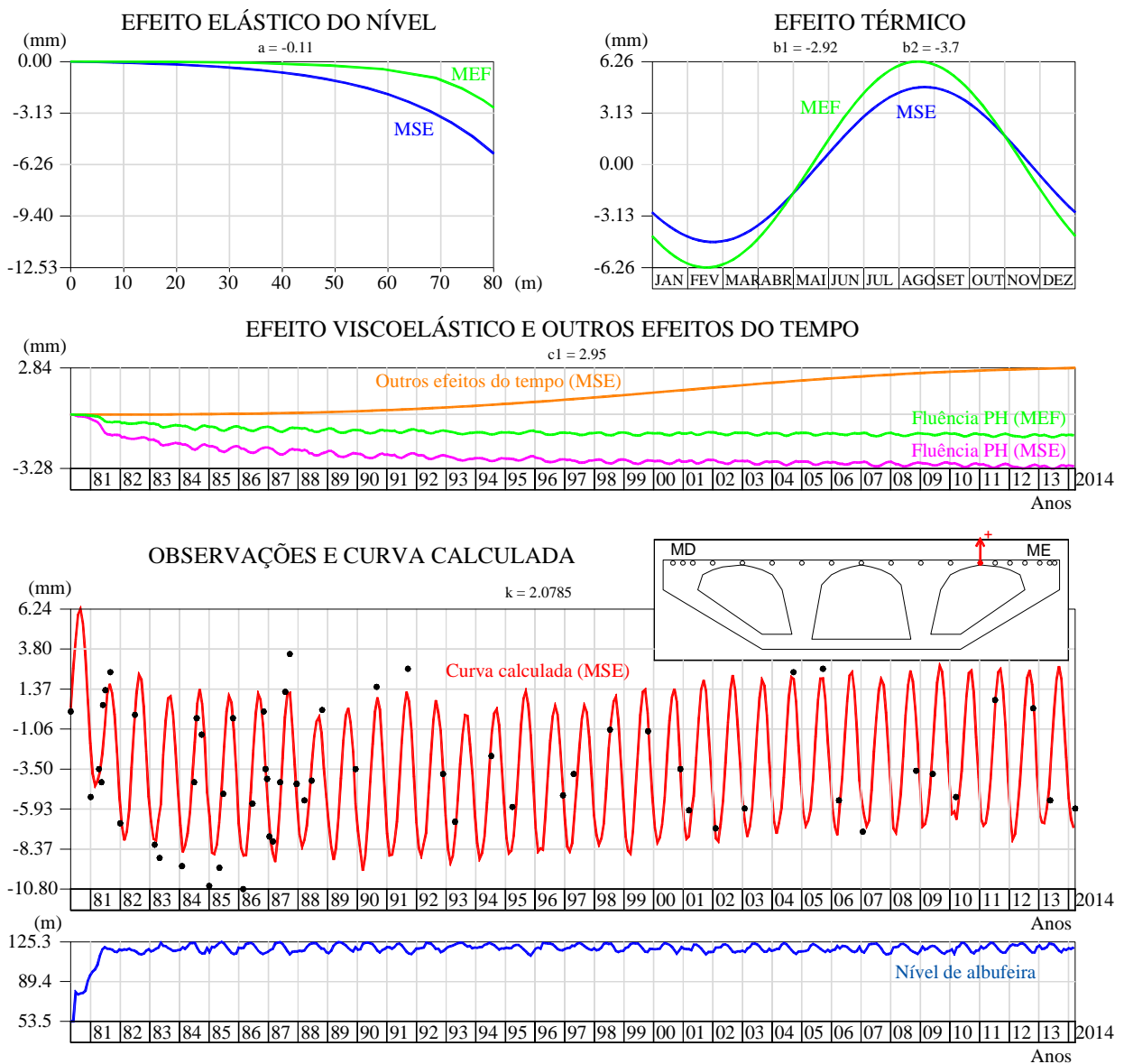


Figura 4.23 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 8.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_i(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$

Efeito elástico das variações térmicas anuais $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_i(t) = c_1 \left(e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta} \right), \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}, \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

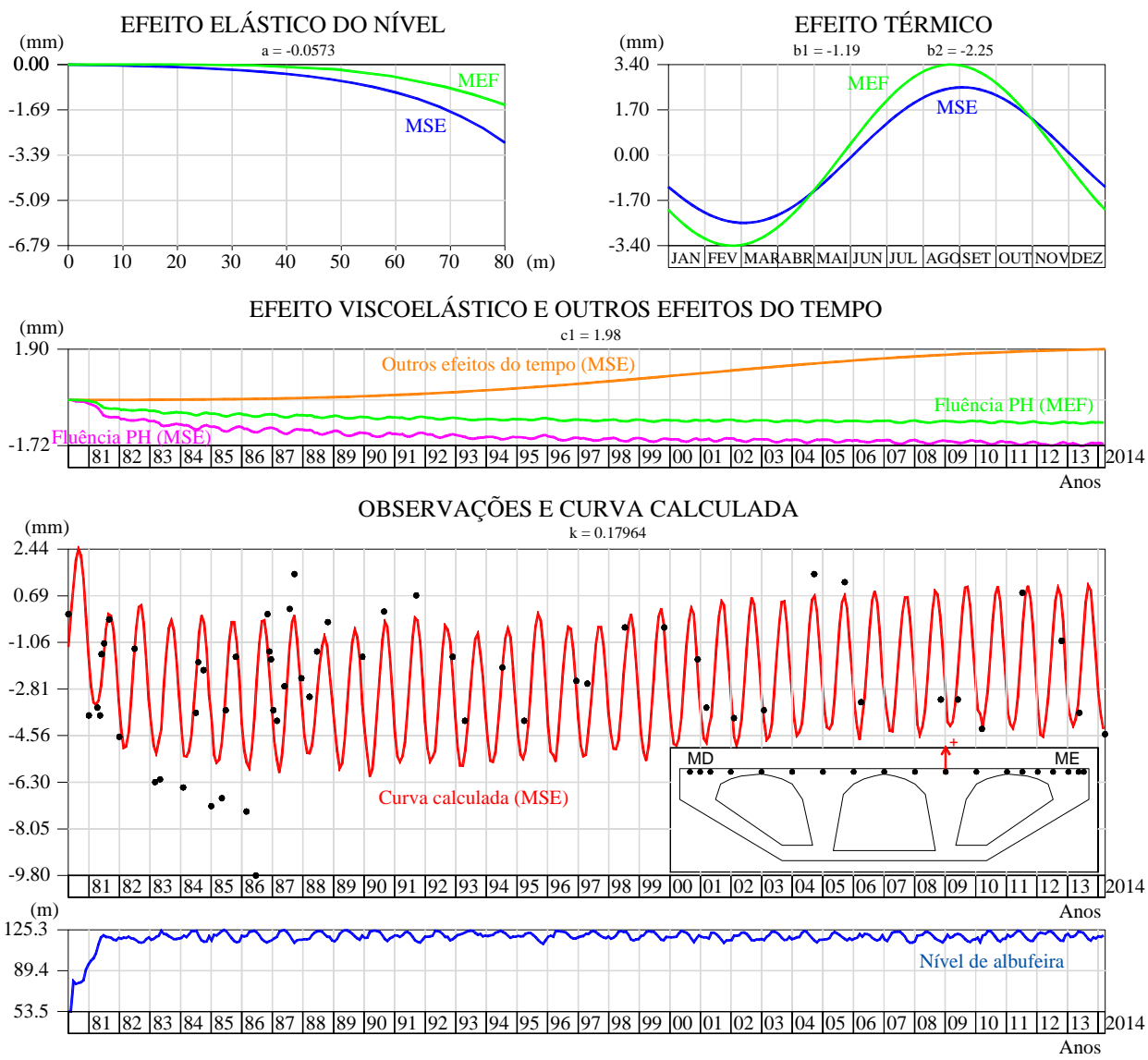


Figura 4.24 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 10.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_r(t) + k$

Efeito elástico do nível

$$u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$$

Efeito elástico das variações térmicas anuais

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)

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

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)

$$u_r(t) = c_1 (e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta}) \quad , \quad \beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1} \quad t_{hs}^n = 8000 \text{ dias} \quad n = 3,258$$

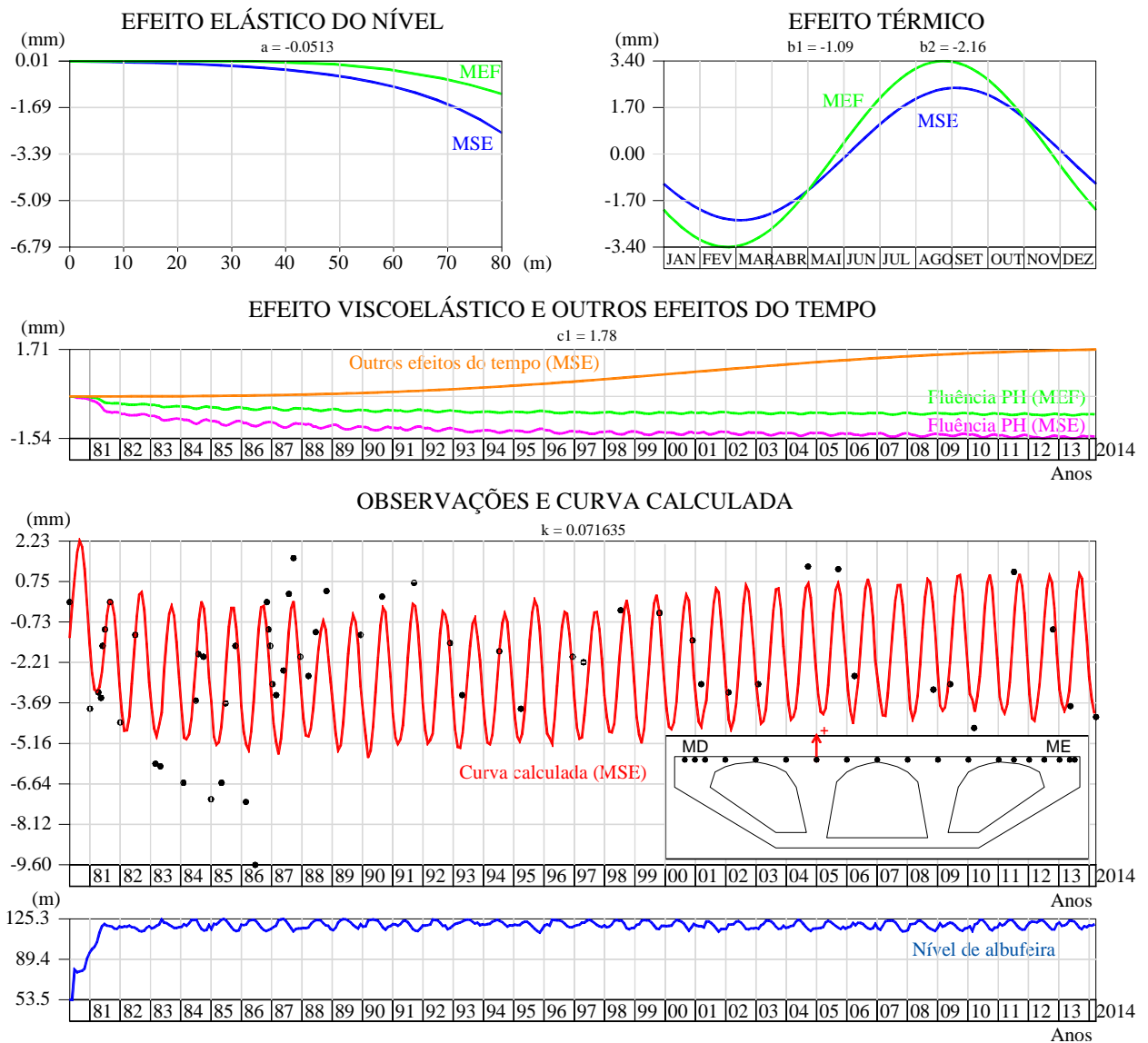


Figura 4.25 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 14.

MODELO DE SEPARAÇÃO DE EFEITOS: $u(h, \bar{t}, t) = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_F(h, t) + u_i(t) + k$

Efeito elástico do nível $u_H(h) = a(e^{h/20} - 1)$ **Efeito elástico das variações térmicas anuais**
 $u_T(\bar{t}) = b_1 \cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365.25}\right)$

Efeito viscoelástico do nível (fluência associada à pressão hidrostática)
 $u_F(h, t) = a \left[\sum_{j=1}^p \phi(t, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) - \sum_{j=1}^{p'} \phi(t_a, t'_j) (e^{h_j/20} - e^{h_{j-1}/20}) \right]$

Outros efeitos do tempo (não relacionados com a fluência associada à PH)
 $u_i(t) = c_1 \left(e^{-t^n/\beta} - e^{-t^n/\beta} \right)$, $\beta = t_{hs}^n \frac{n}{n-1}$ $t_{hs}^n = 8000 \text{ dias}$ $n = 3,258$

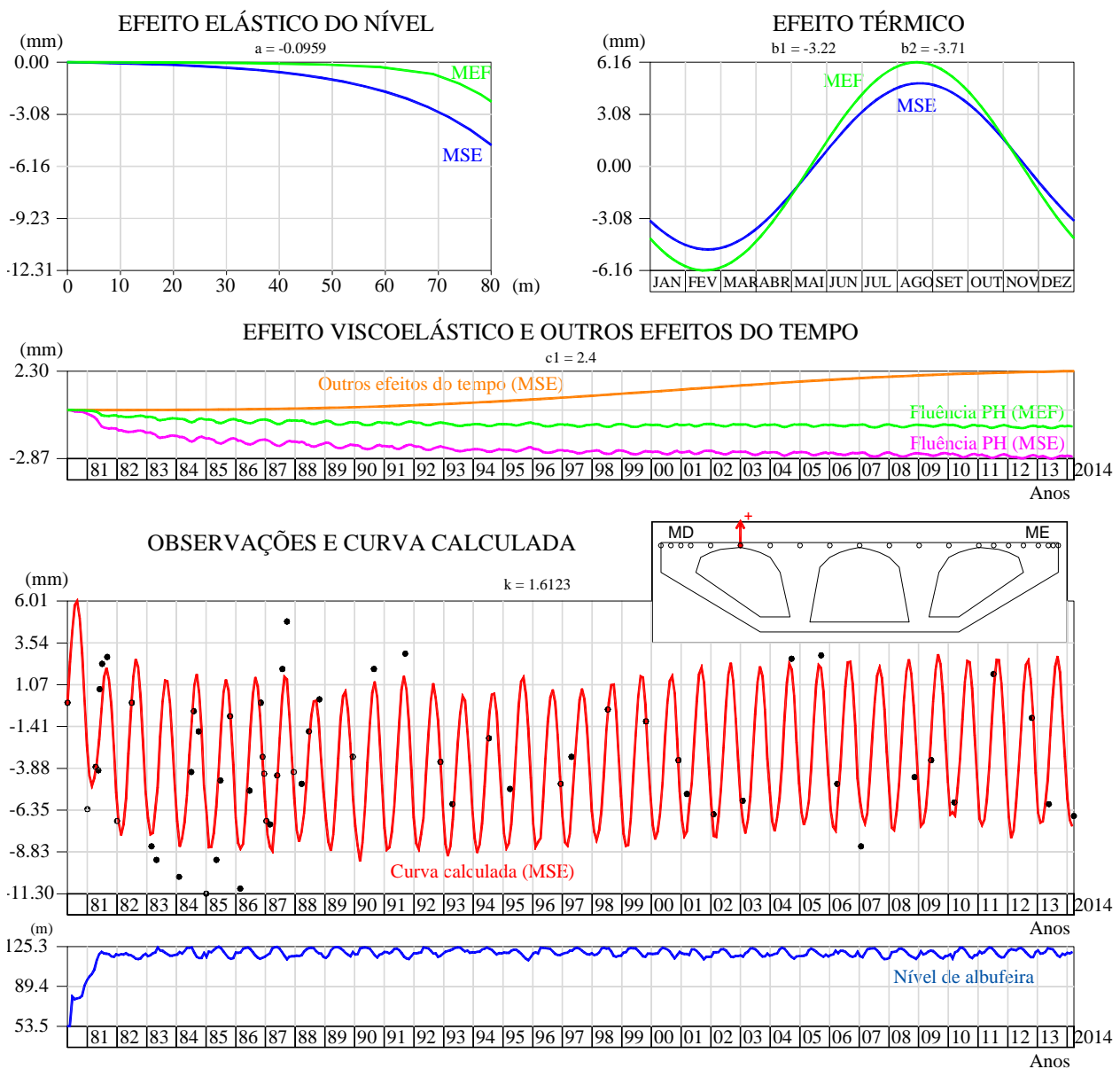
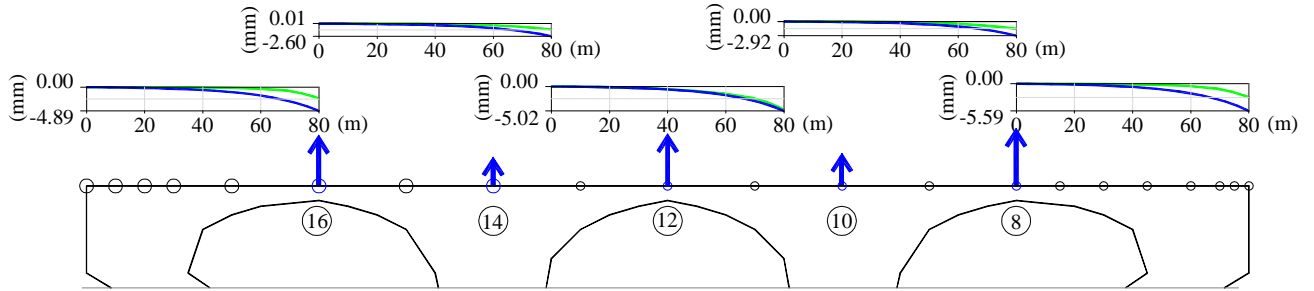


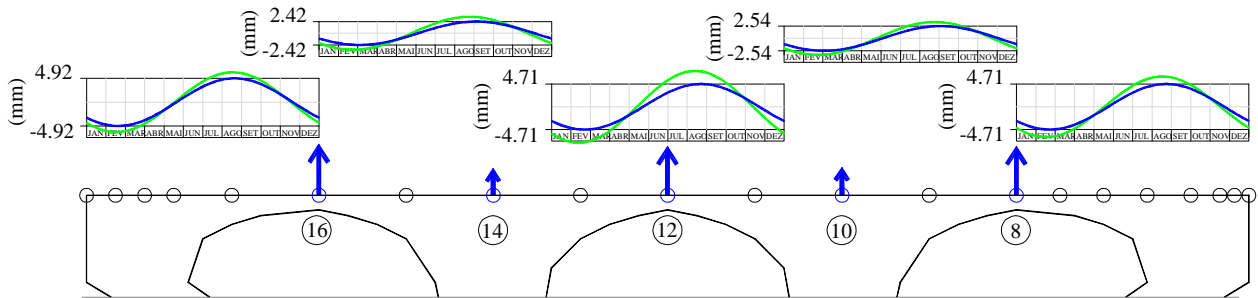
Figura 4.26 – Nivelamento: deslocamento vertical no ponto 16.

NIVELAMENTO

EFEITO ELÁSTICO DO NÍVEL



EFEITO TÉRMICO



EFEITO VISCOELÁSTICO DO NÍVEL E OUTROS EFEITOS DO TEMPO

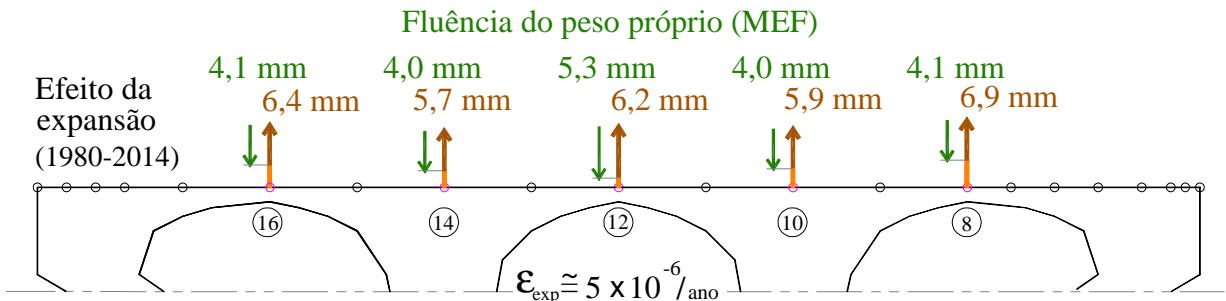
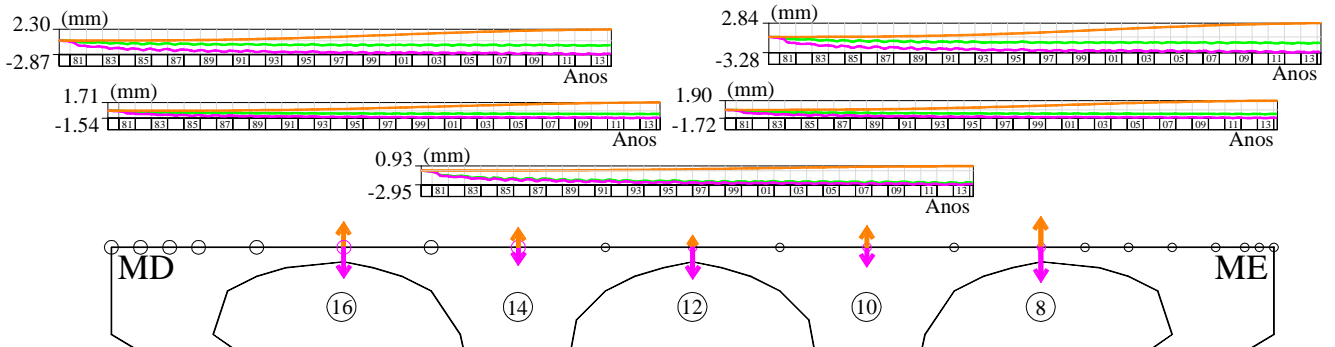


Figura 4.27 – Deslocamentos verticais medidos por nivelamento nos pontos à cota 123,5 m.

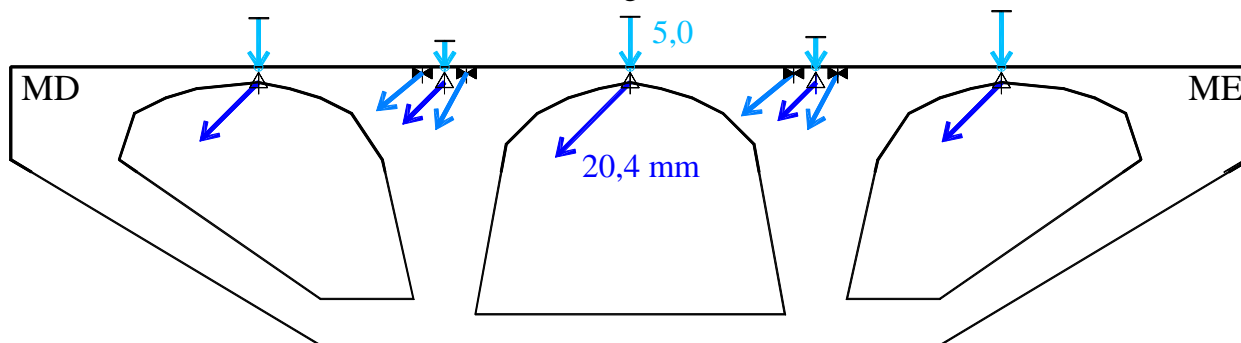
Resultados de síntese referentes à análise comparativa MSE/MEF.

Na Figura 4.28 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos com o MSE, referentes à análise dos deslocamentos radiais (geodesia e fio de prumo) e verticais nos pontos atrás referidos.

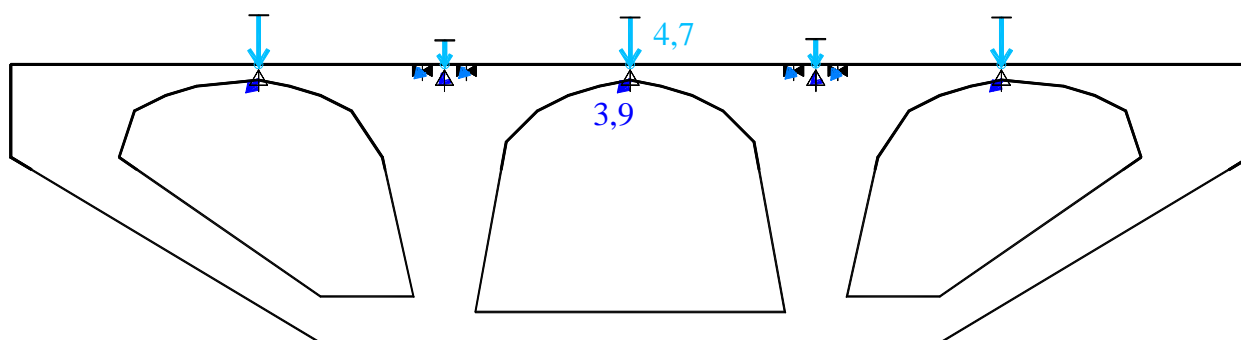
Os deslocamentos horizontais calculados pelo MSE para caracterização do efeito elástico do nível de água e também do efeito térmico, observados por geodesia, estão representados por um azul mais escuro, os observados por fios de prumo por um azul intermédio, e por um azul mais claro os deslocamentos verticais por nivelamento. Para o efeito viscoelástico do nível de água, um gradiente de cores roxo para os deslocamentos horizontais observados por geodesia, rosa para os observados por fios de prumo e magenta para os deslocamentos verticais por nivelamento, assim como o gradiente de laranjas para caracterização dos outros efeitos do tempo.

São também apresentados os valores dos deslocamentos obtidos com o MEF referentes ao efeito da fluência associada ao peso próprio, que, como se pode ver na Figura 4.28, apresentam entre si uma perfeita simetria. Usando estes valores é possível estimar o valor dos deslocamentos devidos ao efeito da expansão, os quais estão também representados na Figura 4.28. A partir dos deslocamentos verticais assim estimados, conclui-se que a taxa média de aumento das extensões devidas à expansão é da ordem dos $\varepsilon_{\text{exp}} = 5,0 \times 10^{-6} / \text{ano}$, o que é coerente com os valores observados nos extensómetros corretores.

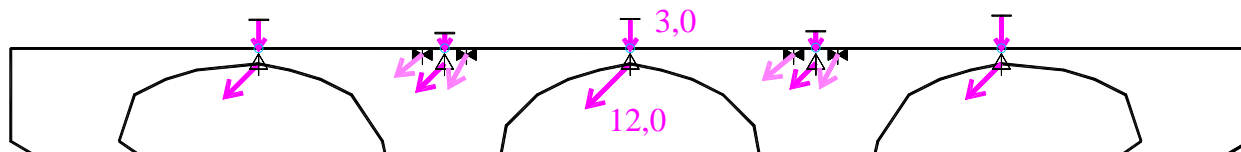
EFEITO ELÁSTICO DO NÍVEL (subida da água até à cota máxima)



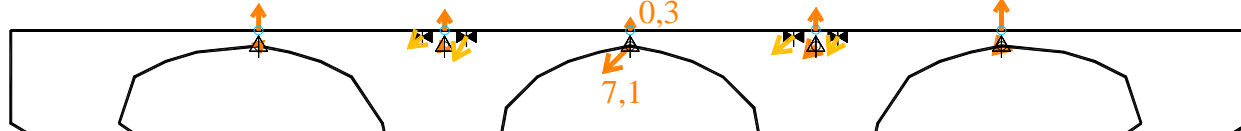
EFEITO TÉRMICO (arrefecimento correspondente à semi-amplitude da onda térmica anual)



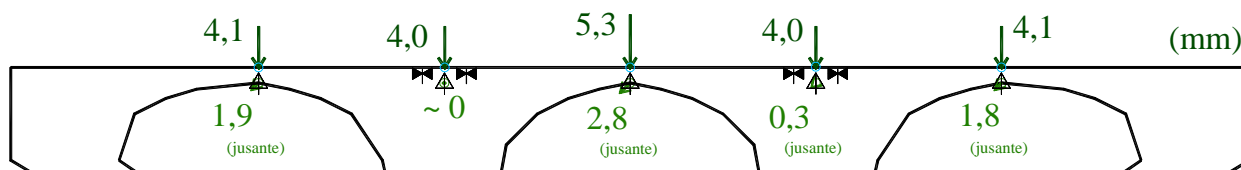
EFEITO VISCOELÁSTICO DO NÍVEL (1980-2014)



OUTROS EFEITOS DO TEMPO (1980-2014): Fluência PP + Expansão



Efeito da fluência do peso próprio 1980-2014 (MEF)



Efeito da expansão 1980-2014

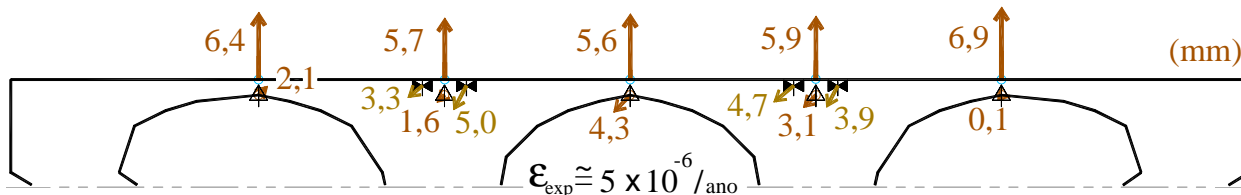


Figura 4.28 – Resultados dos modelos de separação de efeitos aplicados à análise dos deslocamentos radiais (geodesia e fio de prumo) e verticais (nivelamento de precisão).

4.4 Considerações finais

Neste capítulo mostraram-se as diversas potencialidades do programa **DamSafe1.0** no apoio ao controlo da segurança de grandes barragens, através da análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira. Analisa-se a evolução ao longo do tempo do campo de deslocamentos observado na barragem da Aguieira, e salienta-se a versatilidade do **DamSafe1.0**: i) no acesso à sua base de dados de barragens; ii) na escolha das funções a utilizar nos MSE; iii) na calibração dos parâmetros principais do MEF; iv) na visualização gráfica dos resultados obtidos com diferentes tipos de aparelhos. Salienta-se o interesse do **DamSafe1.0** para a obtenção de gráficos que permitam analisar facilmente a coerência entre os resultados da análise dos deslocamentos horizontais, medidos por geodesia e com os fios de prumo, a coerência entre deslocamentos horizontais e verticais, ou ainda a coerência entre os resultados observados e os resultados dos MSE e do MEF.

Salienta-se o bom acordo entre os resultados dos MSE e os resultados da resposta prevista com o MEF para cada uma das principais ações, principalmente para os deslocamentos horizontais devido à pressão hidrostática e às variações térmicas de período anual. Quanto aos efeitos do tempo, refere-se a existência de um processo expansivo (taxa de aumento anual: $\varepsilon_{\text{exp}} = 5,0 \times 10^{-6} / \text{ano}$) que provoca deslocamentos no sentido de jusante e no sentido ascendente, ligeiramente superiores no contraforte e na abóbada esquerdos da barragem, que importam continuar a acompanhar. Salienta-se ainda a perfeita simetria conseguida na representação dos deslocamentos resultantes do MEF devido aos vários efeitos, incluindo o efeito da fluência associada ao peso próprio e à pressão hidrostática.

5

Conclusão

5.1 Síntese do trabalho

O controlo da segurança de grandes barragens em fase de exploração baseia-se em sistemas de monitorização que envolvem componentes de equipamento e *software* que permitem a recolha automática (e manual) de grandes quantidades de informação cuja análise exige o desenvolvimento de módulos computacionais que viabilizem a utilização integrada de modelos de separação de efeitos (MSE) e de modelos de elementos finitos (MEF) para aferir, de forma contínua, se o comportamento observado corresponde ao previsto. A avaliação da segurança da obra depende fundamentalmente desta comparação entre a resposta observada e a resposta prevista com base em modelos numéricos (MEF), devidamente calibrados.

No âmbito deste trabalho, desenvolvido no LNEC (DBB-NMMR) e enquadrado na linha de investigação do DBB relativa à observação e análise do comportamento estrutural de barragens de betão em fase de exploração, foi elaborado um programa computacional, em MATLAB, denominado **DamSafe1.0**, vocacionado para apoio ao controlo de segurança de grandes barragens de betão. O programa **DamSafe1.0** permite analisar os resultados observados (registos ao longo do tempo com os valores das diversas grandezas medidas em obra para controlar a evolução das principais ações e a evolução da resposta estrutural) com base na aplicação de modelos de separação de efeitos (MSE) e na comparação automática com resultados de modelos de elementos finitos (MEF).

5.2 Apreciação dos resultados obtidos

O **DamSafe1.0** permite aceder a uma base de dados com elementos referentes a várias grandes barragens de betão portuguesas, que têm vindo a ser acompanhadas pelo LNEC. Nesta base de dados estão armazenados elementos referentes à observação das referidas barragens e elementos referentes aos respetivos modelos de elementos finitos.

O **DamSafe1.0** permite escolher facilmente, de forma interativa, o tipo de modelo de separação de efeitos pretendido e permite definir, também interactivamente, os principais parâmetros do modelo de elementos finitos disponível (módulos de elasticidade do betão e das diferentes zonas da fundação: à partida o programa propõe ao utilizador valores previamente calibrados de acordo com o anterior comportamento observado).

Quanto aos modelos de separação de efeitos disponíveis no **DamSafe1.0** é de referir que incluem formulações relativamente sofisticadas, desenvolvidas no LNEC (Oliveira S. , 2000) com vista a distinguir os efeitos de tempo devidos à fluência associada à pressão hidrostática, dos efeitos de tempo correspondentes a processos patológicos, como as expansões no betão. No controlo da segurança de barragens abóbada é fundamental ter modelos que permitam efetuar esta separação e quantificar o valor de eventuais parcelas patológicas dos efeitos do tempo. Esta importante potencialidade é bem ilustrada no capítulo 4 em que se mostram diversos resultados obtidos com o **DamSafe1.0** no estudo do comportamento estrutural da barragem da Agueira.

O **DamSafe1.0** também permite visualizar graficamente, no monitor, de forma interativa todos os resultados das análises efetuadas, facilitando assim a realização de experiências com diferentes modelos de separação de efeitos (e com diferentes módulos de elasticidade), o que permite escolher o MSE mais adequado (séries de valores referentes a diversas grandezas medidas em vários pontos da obra) para analisar a resposta medida.

O **DamSafe1.0**, para além de mostrar graficamente, no monitor, os resultados dos modelos MSE e MEF (permite visualizações 3D interativas dos campos de deslocamentos e de tensões principais calculadas com o MEF) permite ainda ao utilizador exportar os resultados (sob a forma de gráficos) para ficheiros de desenho em formato .DXF (facilmente acessíveis para utilizadores de ACAD ou até recorrendo a *software* livre do tipo DXFViewer).

No capítulo 4, referente ao estudo do comportamento estrutural da barragem da Aguieira, mostram-se as diversas potencialidades do **DamSafe1.0** e, em paralelo, mostra-se como este *software* pode ser utilizado em estudos de avaliação da segurança de grandes barragens em fase de exploração, nomeadamente para efetuar a análise do comportamento estrutural de obras que evidenciem problemas relacionados com ações expansivas, como a barragem da Aguieira.

Por fim refere-se que a atual experiência de trabalho com o programa **DamSafe1.0** tem mostrado que se trata de um *software* que, para além de facilitar o trabalho de análise do comportamento de barragens a efetuar correntemente no âmbito das atividades de controlo da segurança (utilização integrada MSE/MEF), também permite aprofundar o conhecimento acerca do comportamento das obras.

5.3 Desenvolvimentos futuros

É de prever que, futuramente, o **DamSafe1.0** venha a evoluir para a forma de uma aplicação *web*, com vista à sua inclusão no sistema informático **GestBarragens**, desenvolvido pelo LNEC em parceria com a EDP, com vista a apoiar as atividades de controlo da segurança de todas as grandes barragens portuguesas.

Desta forma o **DamSafe1.0** daria origem a um módulo *web* denominado **GBModelos**, o qual deveria incluir todas as atuais potencialidades do **DamSafe1.0**, incluindo uma parte interativa para geração de gráficos com resultados de MSE, e ainda a visualização 3D (interativa) de resultados MEF para diversas combinações de ações, em termos de deslocamentos e de tensões principais.

O **GBModelos** deverá permitir também a geração automática de ficheiros de resultados dos cálculos numéricos de elementos finitos com formatos adequados à visualização, com *software* comercial concebido para o tratamento gráfico (por exemplo, formato .DXF de ACAD).

No que se refere ao estudo do comportamento estrutural da barragem da Aguieira, considera-se importante continuar a desenvolver o modelo numérico de EF3D, com vista a possibilitar o estudo da resposta viscoelástica da obra considerando o desenvolvimento do processo expansivo. Para tal há que ter em conta: i) as características de expansibilidade do betão, o que requer a realização de ensaios de expansibilidade sobre provetes retirados de várias zonas da obra); e ii) as condições de humidade e de temperatura nas várias zonas da obra, em particular, no coroamento e nos contrafortes (zona da alma e zona em contacto com a água).

6

Bibliografia

- Bazant, Z. P., & Panula, L. (1979). "Practical prediction of time dependent deformations of concrete". *Mat&Struct*. V12 N° 69.
- Castro, A. T. (1998). "Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão". *Tese de doutoramento (elaborada no LNEC)*. IST, Lisboa.
- Dias, I., & Oliveira, S. (2006). "Geração de malhas de elementos finitos tridimensionais. Desenvolvimento e apresentação do módulo computacional GeMaTA1.0". *Relatório Interno*. LNEC, Lisboa.
- Gomes, J. C. (2007). "Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas". *Tese de doutoramento*. FCTUNL, 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.
- Hughes, T. (1987). "The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis". Englewood Cliffs, Nova Jérquia, EUA: Prentice-Hall, INC.
- LNEC. (1974). "Estudo das fundações da barragem da Aguieira". *Estudo realizado para a EDP (antiga Companhia Portuguesa da Eletricidade)*. LNEC, Lisboa.
- Mata, J. (2013). "Structural safety control of concrete dams aided by automated monitoring systems". *Tese de doutoramento*. IST, Lisboa.
- MathWorks. (2011). *MATLAB® Getting Started Guide: R2011b*.
- MathWorks. (2014). *MATLAB® Creating Graphical User Interfaces: R2014b*.
- Oliveira, A. (1975). "Resistência dos materiais". *Livro II - Elementos da teoria da elasticidade*. Lisboa: Ed. Ass. Estudantes do IST (AEIST) - 2ª ed (1999).
- Oliveira, S. (1991). "Elementos finitos parabólicos para análise estática e dinâmica de equilíbrios tridimensionais". *Trabalho de síntese*. LNEC, Lisboa.

- 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: FEUP.
- Oliveira, S., & Espada, M. (2013). *"Modelos de elementos finitos em MATLAB. Aplicações em dinâmica de estruturas". Folhas de apoio para o 1º curso de modelação em MATLAB realizado no LNEC*. Lisboa.
- Pedro, J. O. (1977). *"Dimensionamento de barragens abóbada pelo método dos elementos finitos". Tese para especialista (Memória nº 479)*. LNEC, Lisboa.
- Ramos, M. (1985). *"Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens"*. LNEC, Lisboa.
- Regulamento de Segurança de Barragens (2007). Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de outubro. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. (s.d.). *Diário da República*, 7459-7474.
- Rocha, M. (1956). *"Nota sobre a interpretação dos resultados da observação de barragens"*. LNEC, Lisboa.
- 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.
- Serafim, L. (1958). *"Análise geral crítica dos métodos de cálculo mais importantes das barragens-abóbada". Memória nº 126*. LNEC, Lisboa.
- 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.